

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Сучасні технології  
та методи розрахунків у будівництві

Збірник наукових праць

Випуск 20

Луцьк – 2023

Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк, ЛНТУ. 2023, Випуск 20, 215 с. ISSN 2410-6208 (друк.)

Modern technologies and methods of calculations in construction. Lutsk, LNTU. 2023, Volume 20, 215 с. ISSN 2410-6208 (print)

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

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

#### **Редакційна колегія:**

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

Заступник редактора – **Пастернак Я.М.**, д.ф.-м.н., професор  
(ВНУ ім. Л. Українки, Луцьк)

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

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

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

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

Матеріали збірника рекомендовані до друку на засіданні вченої ради Луцького національного технічного університету (протокол № 5 від 28 грудня 2023 р.).

**Адреса редакції:** 43018, м. Луцьк, вул. Потєбні, 56, ЛНТУ, кафедра будівництва та цивільної інженерії, телефон (0332) 26-24-60

e-mail: [Zbirnukfbd@gmail.com](mailto:Zbirnukfbd@gmail.com), сайт: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction/>

**ISSN 2410-6208**

© Луцький національний  
технічний університет, 2023

УДК 624.012.25: 539.386

## **ВИКОРИСТАННЯ СПЛАВІВ ІЗ ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ В КОНСТРУКЦІЯХ У СЕЙСМІЧНИХ РЕГІОНАХ: ОГЛЯД ТА ПЕРСПЕКТИВИ**

### **USING SHAPE MEMORY ALLOYS IN CONSTRUCTIONS IN SEISMIC ZONES: REVIEW AND FUTURE NEEDS**

**Ворончак В.І., аспірант, Ясній О.П., д.т.н. проф., Ясній В.П.,  
д.т.н. доц. (Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя, Тернопіль)**

**Voronchak V. I., postgraduate, Yasniy O.P., Dr. Science, Prof.,  
Yasniy V.P., Ph.D. Assoc. (Ternopil Ivan Puluj National Technical  
University, Ternopil)**

*У зв'язку із збільшенням кількості землетрусів, забезпечення стійкості до сейсмічного впливу стає все більш актуальним питанням. Один з можливих шляхів вирішення цього завдання - використання сплавів з пам'яттю форми. В даній статті проведено аналіз поточного стану та перспективи використання сплавів з пам'яттю форми в конструкціях для зниження сейсмічного впливу. Висвітлюються унікальні властивості цих матеріалів, особливо їх здатність відновлювати форму після деформації. Наведено результати досліджень використання сплавів з пам'яттю форми. Окреслено проблеми та обмеження, пов'язані з широким застосуванням в будівельній галузі сплавів з пам'яттю форми, та показано перспективні дослідження даних функціональних матеріалів.*

*In today's environment of increasing seismic activity and toughening requirements for the resistance of buildings to seismic impact, the use of shape memory alloys (SMAs) in structures is becoming one of the most promising areas. This article is devoted to an extended analysis of the current state of the art and prospects for using SMAs to reduce seismic impact on buildings. Shape memory alloys (SMAs) are a special class of materials that can retain their shape and restore it after deformation under external factors such as thermal or mechanical loads. This unique property of FRPs makes them attractive for building structures subjected to seismic loads. One of the key mechanisms of action of SMA is thermoelastic deformation. Under the influence of a certain temperature or mechanical forces, the alloy activates its shape memory and returns to its original configuration. This allows the SMA to adapt to changing environmental conditions and absorb the energy generated during seismic events. Expanded polystyrene in structures reduces the seismic impact on buildings, protecting them from damage and destruction. FRPs can have different chemical compositions, but nickel and titanium*

(NiTi) alloys are the most common. They are characterized by high strength, corrosion resistance, and good electrical properties. NiTi alloys can withstand significant deformations, which makes them effective in ensuring the seismic resistance of structures. In addition, other types of SMAs, such as copper-aluminium (Cu-Al) and iron-titanium (Fe-Ti) alloys, also have their characteristics and can be used in seismic construction. The main advantages of using SMAs in seismic structures are their ability to adapt to changing seismic loading conditions, energy absorption, and reduction of transmitted forces and deformations to the building. Research is being conducted to develop new types of seismic isolators based on SMAs that have improved properties and provide even greater efficiency in reducing seismic impact. However, some problems and limitations are associated with using SMA. These include the high cost of materials, the complexity of designing and testing structures, and the need to ensure stable conditions under operating SMAs in different climatic conditions. As a result, using shape memory alloys in structures to reduce seismic impact is a promising area of research. They have unique properties that contribute to the seismic stability of buildings. Continued research and development of SMAs will help overcome existing problems and ensure the effective use of these materials in seismic construction.

*Ключові слова:* сплави з пам'яттю форми, ефект псевдопружності, сейсмічні ізолятори, розсіювання енергії, коливання, динамічні навантаження.

*Keywords:* shape memory alloys, pseudoelasticity, seismic insulators, energy dissipation, vibrations, dynamic loads.

**Вступ.** Сейсмічна активність є однією з найпоширеніших природних катастроф, яка приносить значні руйнування та загрозу життю людей. Землетруси становлять серйозний виклик для будівельних конструкцій, оскільки вони можуть спричинити значні деформації та руйнування будівель. Тому розробка нових технологій та матеріалів, які допомагають знизити сейсмічний вплив на конструкції і забезпечити їх стійкість, є надзвичайно важливим завданням.

Одним з перспективних напрямків в цьому контексті є використання сплавів з пам'яттю форми в будівельних конструкціях. Сплави з пам'яттю форми (СПФ) - це клас матеріалів, які можуть відновлювати свою форму після деформації під дією зовнішніх факторів, таких як термічні або механічні навантаження. Це унікальна властивість, завдяки якій їх ефективно застосовувати в конструкціях, які піддаються динамічним навантаженням, зокрема сейсмічним.

Механізм дії СПФ базується на явищі термоеластичної деформації. Під впливом певної температури або механічних сил, сплав активує свою пам'ять форми і повертається до свого початкового стану. Це дозволяє СПФ адаптуватися до змін у навколишніх умовах та розсіювати енергію, що виникає під час динамічних навантажень. Таким чином, вони можуть знижувати сейсмічний вплив на будівлі та конструкції, захищаючи їх від пошкоджень та руйнувань. СПФ можуть мати різний хімічний склад, однак, найбільш поширені є на основі нікелю (Ni) та титану (Ti). Часто до

складу СПФ також включають додаткові елементи, що можуть покращувати їх властивості, наприклад, мідь (Cu), алюміній (Al), кобальт (Co), хром (Cr) та інші. За хімічним складом окрім нікель-титанових (Ni-Ti) сплавів які, містять близько 50-55% нікелю та 45-50% титану також незначній кількості домішок, таких як кобальт, хром або залізо є: мідь-алюмінієві (Cu-Al) сплави містять близько 10-15% алюмінію та 85-90% міді, додаткові домішки, такі як нікель, титан або цирконій; Залізо-титанові (Fe-Ti) сплав містить варіації заліза та титану залежно від конкретного сплаву. Можуть містити додаткові елементи, такі як нікель, кобальт, хром тощо.

Нітінол характеризується високою міцністю, корозійною стійкістю, біосумісністю та відмінними електричними властивостями. Крім цього, NiTi сплави можуть витримувати високі деформації (до 8%) [1]. Межа міцності сплавів на основі нікелю та титану (NiTi) може значно варіюватися залежно від хімічного сплаву, обробки та умов випробування [2]. Зазвичай границя міцності NiTi сплавів знаходиться у діапазоні від 300 до 1000 МПа. Висока границя міцності сплавів NiTi пов'язана з їх унікальними механізмами деформації, такими як псевдопружність та мартенситні перетворення. Ці механізми дозволяють NiTi сплавам витримувати значні навантаження без постійного пошкодження або деформації завдяки чому вони широко використовуються в багатьох сферах, зокрема в медицині [3], авіації [4, 5, 6], машинобудуванні [7, 8, 9, 10], будівництві [10, 11, 12, 13] та ін.

В контексті сейсмостійкого будівництва, одним з потенційних застосувань СПФ є їх використання в сейсмічних ізоляторах.

Сейсмічні ізолятори - це конструктивні елементи, які ізолюють будівлю від землі, знижуючи передачу сейсмічних хвиль від ґрунту до будівлі. Вони використовуються в сейсмостійких конструкціях з метою поглинання та розсіювання енергії землетрусу, що допомагає зменшити руйнування будівлі.

### **Приклади застосування СПФ у конструкціях**

Сплави із пам'яттю форми можуть застосовуватися у конструкціях в якості різних елементів: дротин, стержнів, пружин, самоцентрувальних демпферів [14].

У дослідженні [11] розроблено альтернативні самоцентрувальні пристрої, що характеризуються інтелектуальним елементом, який зменшує пошкодження сталевих щільних демпферів розсіювання енергії (Рис. 1). Поєднання сталевих щільних демпферів із надпружними стержнями із СПФ забезпечують самоцентрування при розвантаженні та відповідно, сприяють зменшенню постійної деформації сталевих демпферів. Сталеві щільні демпфери в поєднанні з надпружними згинальними стержнями СПФ оцінювали з точки зору непружної поведінки, змодельованої за допомогою уточненого аналізу методом скінчених елементів. Моделі

щілинних демпферів, що піддаються циклічним навантаженням, відкалібрували за наявними результатами випробувань з метою точного прогнозування поведінки. Реакції запропонованих щілинних демпферів порівняли з реакціями традиційних щілинних демпферів. В результаті, використання СПФ-стержнів допомагають зменшити постійну деформацію в середньому на 27% порівняно зі звичайною щілинною демпferною системою. Коефіцієнти самоцентрування демпферів із використанням СПФ перевищують 76% для всіх модельних випадків.

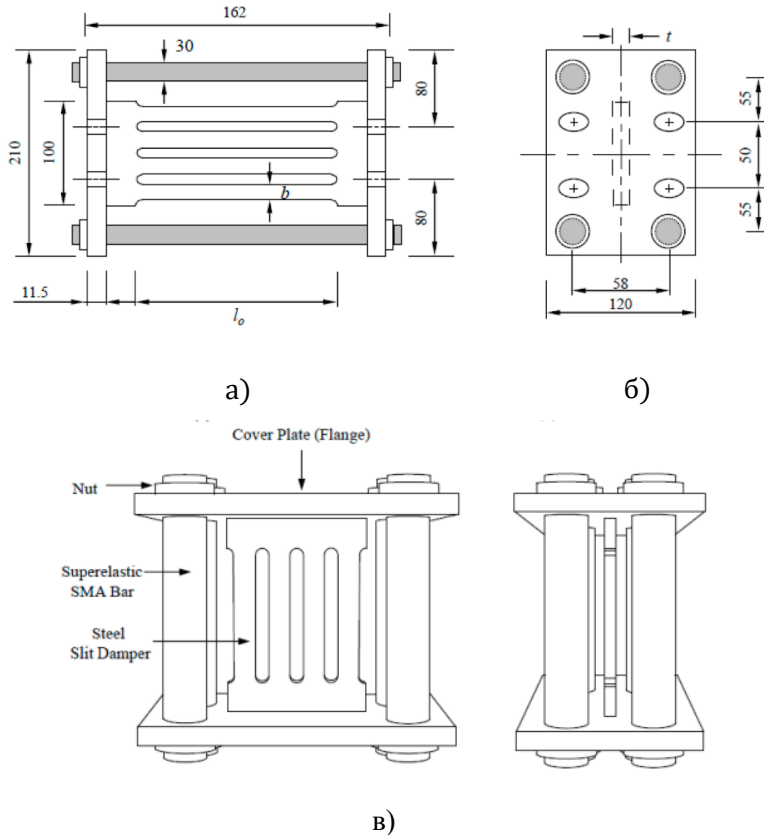


Рис. 1. Схема щілинного демпфера із надпружними СПФ-стержнями:  
а) вид спереду; б) вид зверху; в) 3D вид [11]

Дослідження [12] демонструє перспективу у застосуванні СПФ-пружин, в якості елемента підвищення сейсмічної стійкості будівельних конструкцій завдяки компактній формі, демпфуючим властивостям, здатності до відновлення і гнучкій жорсткості. Авторами представлено

концепцію пружини, виготовленої з надпружного СПФ-дроту із (NiTi) сплаву (Рис. 2). Для визначення та оцінки втомних характеристик, пружину піддали циклічному навантаженню. Отримані результати (Таблиця 1) було використано при моделюванні поведінки СПФ.



Рис. 2. Пружина із СПФ-дроту [12]

Таблиця 1

Властивості СПФ для моделювання методом скінченних елементів

$E_A$	$E_M$	$\sigma_{Ms}$	$\sigma_{Mf}$	$\sigma_{As}$	$\sigma_{Af}$	$\epsilon_t$
48 ГПа	38 ГПа	550 МПа	760 МПа	520 МПа	300 МПа	0,04

Методом скінченних елементів, підтверджено подібність модельної поведінки до натурної. На основі скінченно-елементної моделі, побудованої в платформі для моделювання сейсмостійкості OpenSees, СПФ-пружину досліджено на рівні ізоляції триповерхової сталеві рами. Результати порівнювались із звичайною еластичною пружиною. Обидві ізольовані рами піддавались трьом динамічним навантаженням, що відповідають записам дійсних землетрусів. Порівняння показало, що використання пружин СПФ є більш ефективним у контролі максимальної та залишкової деформації для захисту споруд. СПФ-пружина продемонструвала відмінну здатність до самоцентрування, еквівалентний коефіцієнт демпфування становив більше 2%.

У статті [13] розглянуто сейсмічну дію і характеристики самоцентрувальних фрикційних демпферних скоб, які піддавали декільком максимальним або проєктним коливанням ґрунту під час землетрусу. Самоцентрувальні фрикційні демпферні скоби використовували як частину системи кріплення. Деталі самоцентрувальних фрикційних демпферних скоб схематично зображено на Рис. 3. Самоцентрувальні фрикційні демпферні скоби складаються із двох зрізних пластин, чотирьох болтів, отворів для болтів і багатожильного надпружного дроту СПФ. У

порівнянні зі звичайними розпірними елементами для використання в сталевих концентрично закріплених конструкціях рам, ці самоцентрувальні фрикційні демпферні елементи найкраще продемонстрували свою здатність до самоцентрування для мінімізації залишкових деформацій. Таким чином, витримавши задане навантаження необхідності у заміні елемента не було. У цьому дослідженні описано конфігурацію та механізм реагування самоцентрувальних фрикційних скоб та проведено параметричні дослідження за допомогою нелінійного аналізу часової історії, виконаного на чисельних моделях пружин з одним ступенем вільності. Після аналізу результатів дослідження запропоновано методологію проектування, яка оптимально враховує здатність до самоцентрування та дисипації енергії відповідно до їхніх порівняльних параметрів, з метою використання переваг енергетичного потенціалу та одночасної мінімізації залишкових деформацій.

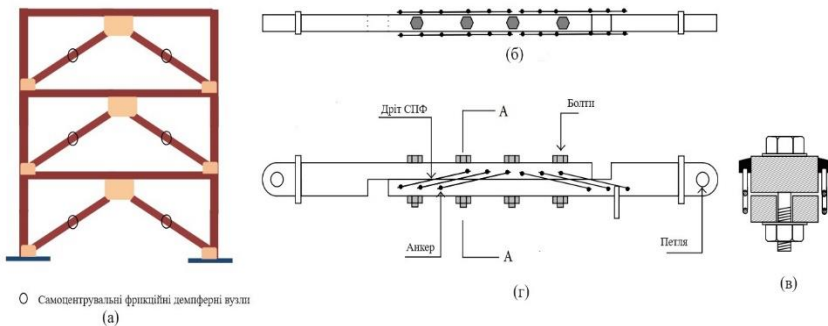


Рис. 3. Схема рами із застосування самоцентрувальних фрикційних демпферних скоб: а) рама з розкосами (вид спереду); б) вид спереду; в) розрізі А-А; г) вид зверху [13]

Для досягнення оптимальної конструкції, яка б забезпечувала зменшення постійної деформації і збільшення здатності до розсіювання енергії, сили самоцентрування повинні бути трохи більшими або, принаймні, рівними силам тертя. Це може бути досягнуто шляхом регулювання початкового натягу болтів з метою простого контролю сил тертя в системі. Ця оптимальна концепція проектування, застосована до інтелектуальних систем самоцентрування, перевірена за допомогою статистичного дослідження, виконаного на основі декількох результатів аналізу.

Результати досліджень підтверджують потенціал застосування СПФ в активних системах контролю вібрацій для покращення стійкості будівельних конструкцій під дією динамічних навантажень, зокрема



землетрусів. Використання СПФ-елементів дозволяє ефективно дисипувати енергію та знижувати амплітуду коливань, забезпечуючи більшу безпеку та стійкість будівель.

## References

1. DesRoches, R.; Smith, B. Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: A critical review of their potential and limitations. *J. Earthq. Eng.* 2004, 8, 415–429.
2. Iasnii V., Bykiv N., Yasniy O., Budz V. (2022) Methodology and some results of studying the influence of frequency on functional properties of pseudoelastic SMA. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol. 107, no 3, pp. 45-50
3. Peng C. et al. Bio-inspired Design Methodology of Sensor-actuator-structure Integrated System for Artificial Muscle Using SMA // *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 2017. Vol. 65. P. 299–303.
4. Zhang Q. et al. Development and experimental verification of an adaptive structure for phased antenna array using SMA bunch // *Eng Struct*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 225. P. 111293.
5. Ajaj R.M. et al. Recent developments in the aeroelasticity of morphing aircraft // *Prog Aerosp Sci*. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 120. P. 100682.
6. Pecora R. et al. SMA for aeronautics // *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. P. 527–559.
7. Leary M. et al. Design of shape memory alloy actuators for direct power by an automotive battery // *Mater Des*. Elsevier, 2013. Vol. 43. P. 460–466.
8. Zadafiya K. et al. Recent trends in non-traditional machining of shape memory alloys (SMAs): A review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 32. P. 217–227.
9. Riccio A. et al. Shape memory alloys (SMA) for automotive applications and challenges // *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. P. 785–808.
10. Yasnij P.V., Yasnij V.P. Dempfuyuchy`j pry`strij dlya transportuvannya dovgomirny`x konstrukcij. Patent na korysnu model` #116582 vid 25.05.2017: pat. Byuleten` #10 USA. Ukrayina, 2017.
11. Seo J., Kim Y.C., Hu J.W. Pilot study for investigating the cyclic behavior of slit damper systems with recentering shape memory alloy (SMA) bending bars used for seismic restrainers // *Appl Sci*. 2015. Vol 5, № 3. P 187–208.
12. Liu Y. et al. Seismic behavior of superelastic shape memory alloy spring in base isolation system of multi-story steel frame // *Materials (Basel)*. 2019. Vol 12, № 6.
13. Hu J.W., Noh M.H. Seismic Response and Evaluation of SDOF Self-Centering Friction Damping Braces Subjected to Several Earthquake Ground Motions // *Adv Mater Sci Eng*. Hindawi Publishing Corporation, 2015. Vol 2015.
14. Application of alloys with shape memory in building structures Bykiv N.Z., Yasniy V.P. Modern technologies and methods of calculations in construction, 3-14.
15. Iasnii V., Yasniy O., Homon S., Budz V., Yasniy P. Capabilities of self-centering damping device based on pseudoelastic NiTi wires. *Engineering Structures*. 2023. Vol. 278, 115556.

## Література

1. DesRoches, R.; Smith, B. Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: A critical review of their potential and limitations. *J. Earthq. Eng.* 2004, 8, 415–429.
2. Ясній В., Биків Н., Ясній О., Будз В. (2022) Методика та деякі результати дослідження впливу частоти на функціональні властивості псевдопружних СПФ. Науковий вісник ТНТУ (Терн.), vol. 107, no 3, pp. 45-50.
3. Peng C. et al. Bio-inspired Design Methodology of Sensor-actuator-structure Integrated System for Artificial Muscle Using SMA // *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 2017. Vol. 65. P. 299–303.
4. Zhang Q. et al. Development and experimental verification of an adaptive structure for phased antenna array using SMA bunch // *Eng Struct*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 225. P. 111293.
5. Ajaj R.M. et al. Recent developments in the aeroelasticity of morphing aircraft // *Prog Aerosp Sci*. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 120. P. 100682.
6. Pecora R. et al. SMA for aeronautics // *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. P. 527–559.
7. Leary M. et al. Design of shape memory alloy actuators for direct power by an automotive battery // *Mater Des*. Elsevier, 2013. Vol. 43. P. 460–466.
8. Zadafiya K. et al. Recent trends in non-traditional machining of shape memory alloys (SMAs): A review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 32. P. 217–227.
9. Riccio A. et al. Shape memory alloys (SMA) for automotive applications and challenges // *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. P. 785–808.
10. Ясній П.В., Ясній В.П. Демпфуючий пристрій для транспортування довгомірних конструкцій. Патент на корисну модель №116582 від 25.05.2017: пат. Бюлетень №10 USA. Україна, 2017.
11. Seo J., Kim Y.C., Hu J.W. Pilot study for investigating the cyclic behavior of slit damper systems with recentering shape memory alloy (SMA) bending bars used for seismic restrainers // *Appl Sci*. 2015. Vol 5, № 3. P 187–208.
12. Liu Y. et al. Seismic behavior of superelastic shape memory alloy spring in base isolation system of multi-story steel frame // *Materials (Basel)*. 2019. Vol 12, № 6.
13. Hu J.W., Noh M.H. Seismic Response and Evaluation of SDOF Self-Centering Friction Damping Braces Subjected to Several Earthquake Ground Motions // *Adv Mater Sci Eng*. Hindawi Publishing Corporation, 2015. Vol 2015.
14. Застосування сплавів із пам'яттю форми У будівельних конструкціях Биків Н.З., Ясній В.П. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 3-14.
15. Ясній В., Ясній О., Гомон С., Будз В., Ясній П. Можливості самоцентруючого демпферного пристрою на основі псевдопружних NiTi дротів. Інженерні конструкції. 2023. Vol. 278, 115556.

## ТРИВАЛА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ З ДЕРЕВИНИ

### LONG-TERM EXPLOITATION OF ELEMENTS AND STRUCTURES OF WOOD

Дацюк В.В, аспірант (Луцький національний технічний університет), Гомон Св.Св., д.т.н., проф. (Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне), Петренко О.В, ст. викл., к.т.н. (Національний університет «Львівська Політехніка»)

**Datsiuk V.V., postgraduate (Lutsk National Technical University), Homon S.S., Dh.D., professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), Petrenko O.V., Ph.D., senior lecturer (Lviv Polytechnic National University)**

*У даній праці здійснено аналіз роботи деревини після тривалої експлуатації з дослідження її фізико-механічних властивостей в наукових публікаціях, які є в наявності на даний час. Проаналізувавши наявні наукові публікації, приходимо до висновку, що практично відсутні експериментально-теоретичні дослідження основних фізико-механічних властивостей деревини після тривалої експлуатації протягом терміну служби 25-75 років та вище. Також не встановлено роботу таких матеріалів в закритичній стадії деформування.*

*Elements and structures made of wood have been used for hundreds of years for the construction of objects of various purposes. These include residential, public and industrial buildings and structures, bridges and overpasses, scaffolding, strengthening the shores of ponds and lakes, benches, gazebos and many others. There are many historical objects in the world and not only (temples, residential and public buildings, engineering structures) that are built from products, elements and structures based on wood*

*Materials, products, elements and structures made of wood are often used for a long time in various environments. The time of operation can be long (decade) or short. As a rule, the duration depends on the aggressiveness of the environment and the protection of the wood itself.*

*In recent years, civil engineers have faced the problem of surveying buildings and structures, including load-bearing elements and structures based on wood, and assessing their condition before further operation. As practice shows, many materials, products, elements and structures made of wood have a fairly good residual resource after long-term use. Over time, wood needs additional protection from pests, environmental aggression, rotting and fire. Also, in some cases, such elements and structures are subject to repair and reconstruction.*

*In this work, an analysis of the work of wood after long-term exploitation is carried out based on the study of its physical and mechanical properties in scientific publications*

that are currently available. After analyzing the available scientific publications, we come to the conclusion that there are practically no experimental and theoretical studies of the main physical and mechanical properties of wood after long-term use during the service life of 25-75 years and above. The operation of such materials in the final stage of deformation has also not been established.

*Ключові слова:* деревина, термін служби, механічні властивості, експлуатація, деформування.

*Keywords:* wood, service life, mechanical properties, exploitation, deformation.

**Постановка проблеми.** Елементи та конструкції з деревини вже сотні років використовуються для будівництва об'єктів різного призначення. До таких можливо віднести житлові, громадські та промислові будівлі і споруди, мости та мостові переходи, риштування, укріплення берегів ставків та озер, лави, альтанки та багато інших.

Деревина також має широке застосування і в інших галузях економіки.

Матеріали, виробі, елементи і конструкції з дерева часто використовуються протягом тривалого часу в різних середовищах. Час експлуатації може бути тривалим (десятиліття) або недовгим. Як правило, тривалість залежить від агресивності навколишнього середовища і захисту самої деревини.

В останні роки інженери-будівельники зіткнулися з проблемою обстеження будинків і споруд, в тому числі несучих елементів і конструкцій на основі деревини, і оцінки їх стану перед подальшою експлуатацією [1]. Як показує практика, багато матеріалів, виробів, елементів і конструкцій з дерева мають досить хороший залишковий ресурс після тривалого використання (рис.1, 2) [2]. З плином часу деревина потребує додаткового захисту від шкідників, агресивності навколишнього середовища, гниття і пожежі [3]. Також в деяких випадках такі елементи і конструкції підлягають ремонту та реконструкції [4].

**Аналіз відомих досліджень і публікацій.** Деревина може експлуатуватися сотні років за певних умов роботи. У світі є багато історичних об'єктів і не тільки (храмів, житлових та громадських будівель, інженерних споруд), які побудовані з виробів, елементів та конструкцій на основі деревини [5].

Багато вчених приділяли і далі приділяють велику увагу дослідженню фізико-механічних властивостей деревини за різних видів навантаження та різних умов експлуатації [6-9]. Зокрема, суцільної, клеєної, модифікованої та інших. Нами також проводиться робота в даному напрямку. Особливо, це стосується роботи деревини в докритичній та закритичній стадії деформування за різних умов експлуатації [10-15].

В подальшому ми хочемо провести комплексні експериментально-

теоретичні дослідження механічних властивостей деревини після її тривалої експлуатації.



Рис.1. Стан крокв'яної системи адміністративного приміщення після тривалої експлуатації



Рис.2. Стан несучих конструкцій житлового будинку після тривалої експлуатації

**Метою даної праці** є проведення аналізу роботи виробів, елементів та конструкцій на основі деревини після їх тривалої експлуатації (за різних умов експлуатації), які є в літературних джерелах на даний час.

**Основна частина.** Спробуємо проаналізувати роботу виробів, елементів та конструкцій на основі деревини після їх тривалої експлуатації. Тобто, що саме є в наукових публікаціях про зміну основних фізико-механічних властивостей деревини за різних умов тривалої експлуатації. В літературі знаходимо різні напрямки досліджень з даного питання. Розглянемо деякі з них.

Отже, в роботі [1] висвітлено особливості обстеження елементів та конструкцій з деревини після їх тривалої експлуатації. Автори порівняли механічні властивості деревини шляхом вимірювання неруйнівними приладами та проведенням руйнівних випробувань. Найважливішим результатом є порівняння статичного і динамічного модулів пружності деревини та подальше порівняння класів міцності, отриманих різними методами вимірювання.

Метою роботи [3] є вивчення впливу різного віку та пошкодження деревини дуба на температуру спалаху та температуру займання. Авторами було проаналізовано термонавантажені зразки 5-річної деревини дуба, 160-річної деревини дуба, а також 160-річної деревини дуба, деградованої дереворуйнівними комахами та грибами. Дослідники встановили, що при термічному навантаженні деревини дуба відбуваються значні зміни, особливо в поверхневих шарах. Окрім зміни кольору, продемонстровані хімічні зміни основних компонентів деревини та екстрактивних речовин. З підвищенням температури збільшується і вміст екстрагованих етанолом і толуолом речовин. Збільшення їх кількості відбувається в основному за рахунок лігніну, але частково також за рахунок продуктів розпаду полісахаридів.

Автори [4] провели довготривале польове дослідження на різних пробних стінах з дерев'яними балками. У цій статті розглядаються 2,5-річні вимірювання шляхом аналізу вмісту вологи на кінцях балок для різних випробувальних стін. Використання пароізоляційних матеріалів має лише незначний сприятливий вплив. З іншого боку, заходи щодо зниження вологості стіни мають значний ефект, або шляхом локального розривання ізоляції на з'єднанні балок, або шляхом застосування водовідштовхувальної обробки. Контроль дощового навантаження на стіну, здається, є ключовим моментом для захисту від вологи внутрішньої ізоляції з збудованими дерев'яними балками.

В роботі [5] частина пошкоджених дерев'яних компонентів стародавньої архітектури храму Данся в Китаї була ідентифікована за допомогою мікроскопа, а хімічний склад клітинних стінок спостерігався за допомогою поляризованого та флуоресцентного світла відповідно. Встановлено, що склад целюлози був пошкоджений грибами та комахами.

У статті [16] розглядаються механічні властивості деревини ялини, історично використовуваної деревини дуба та рідко згадуваної деревини модрина. Основна увага приділяється деревині модрина, яка вирізнана зі стелі

нерухомої пам'ятки культури XVII століття – визначенню її віку, історичної важливості та механічних властивостей. Механічні властивості були отримані за допомогою стандартних випробувань на стиснення паралельно і перпендикулярно волокнам, і на згин. Результати випробувань порівнювались з механічними властивостями деревини дуба, звичайної деревини ялини та нещодавно зрубаної деревини модрина.

У праці [17] розглядалося вплив мікроклімату на історичні дерев'яні будівлі, які піддаються впливу відкритих морських потоків. Морський особняк Флорії Агатюрк у Стамбулі, зведений на березі моря, абсолютно незахищений від погоди та морських впливів, був обраний як приклад для багатьох інших будівель, розташованих на лінії Босфору. Щоб розглянути вплив навколишнього середовища на будівлю, що піддається впливу потоків відкритого моря, мікрокліматичні дані збиралися протягом одного року. Синергічний ефект аерозолу морської солі та мікрокліматичних умов обговорювався для оцінки впливу морського середовища на довговічність особняка, виявлення більш вразливих частин будівлі, а також більш критичних періодів. Результати показують, що коли вміст вологи змінюється від 20,9% до 36,7%, а температура змінюється від 14,1°C до 28,7°C, коефіцієнт теплопровідності збільшується.

В праці [18] автори досліджували граничну міцність на стиск паралельно волокнам (UCS) деревини є одним із важливих показників для оцінки міцності конструкції старих дерев'яних будівель. Деревина тополі, деревина модрина китайської і деревина ялиці китайської були обрані як моделі в цій статті. Метою дослідження є прогнозування UCS деревини за допомогою методів резистографа та вилучення гвинтів.

Досить вагомий вклад з даного питання зробив український вчений Гайда С.В. [2]. Автор вивчав механічні властивості деревини ялиці різного віку (з точки зору терміну служби), оскільки відсутні нормативні документи, що визначають фізико-механічні властивості деревини різного віку, які необхідні для прогнозування властивостей одержуваних майбутніх виробів. Вивчалися механічні властивості деревини ялиці в діапазоні використання від 0 до 20 років, з використанням проміжного контролю характеристик кожні 5 років. Було встановлено, що з плином часу експлуатації в різних умовах, особливо на відкритому повітрі, механічні властивості змінюються головним чином у бік зниження.

Проаналізувавши наукові публікації, які є на даний час за даною тематикою, приходимо до висновку, що практично відсутні експериментально-теоретичні дослідження основних фізико-механічних властивостей деревини після тривалої експлуатації протягом терміну служби та вище 25-75 років. Також не встановлено роботу таких матеріалів в закритичній стадії деформування.

Отже, для подальших досліджень дана проблематика є досить актуальною.

## Висновки

1. В даній праці здійснено аналіз роботи деревини після тривалої експлуатації з дослідження її фізико-механічних властивостей в наукових публікаціях, які є в наявності на даний час.

2. Проаналізувавши наявні наукові публікації, приходимо до висновку, що практично відсутні експериментально-теоретичні дослідження основних фізико-механічних властивостей деревини після тривалої експлуатації протягом терміну служби 25-75 років та вище.

3. Також не встановлено роботу таких матеріалів в закритичній стадії деформування.

## References

1. Posta J., Ptacek P., Jara R., Terebesyova M., Kuklik P., Dolejs J. (2016). Correlations and differences between methods for non-destructive evaluation of timber elements. *Wood research* 61(1), Pp. 129-140.
2. Hayda S.V. Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostryy vzhyvanoyi derevyny yalytsi z vikom. Lisove hospodarstvo, lisova, paperova ta derevoobrobna promyslovisht'. L'viv: NLTU, 2017. Vyp. 43. S. 58-73.
3. Zachar M., Majlingova A., Mitterova I., Cabalova I. (2017). Influence of an age and damage of the oak wood on its fire risk. *Wood research* 62(3), Pp. 495-504.
4. De Mets, T., Tilmans, A. (2020). Evaluation of the risk of decay of wooden beams embedded in internally insulated walls by long-term measurements. *E3S Web of Conferences* 172, article number 01002.
5. Yang Y., Sun H., Yang S., Wang A., Zhao R., Wang W., He Y., Li B., Zhang B., Wu Q. (2021). Internal cause analysis of damage of wooden components in Danxia temple ancient architectures: tree species. *Wood research* 66(2), Pp. 297-308.
6. Landis E.N., Vasic, S., Davids W.G. Parrod, P. (2002). Coupled experiments and simulations of microstructural damage in wood. *Experimental Mechanics* 42, Pp. 389-394.
7. Zacic B.D. (1974). Inelastic bending of wood beams. *Journal of the Structural Division* 99(10), Pp. 2079-2092.
8. Patton-Mallory M., Cramer S. (1987). Fracture mechanics: a tool for predicting wood component strength. *Forest Products Journal* 37 (7/8), Pp. 39-47.
9. Green D.W., Kretschmann D.E. (1992). Properties and grading of Southern Pine Woods. *Forest Products Journal* 47 (9), Pp. 78-85.
10. Homon Sv.Sv, Yasniy P.V., Homon P.S., Yasniy V.P. Klasychna model' diysnoyi roboty sutsil'noyi ta modyfikovanoyi derevyny os'ovym styskom vzdovzh volokon: monohrafiya. Rivne: Volyns'ki oberehy, 2023. 316 s.
11. Homon S.S., Homon P.S. Pobudova diysnykh diahram mekhanichnoho stanu derevyny «s-u» sutsil'noho pererizu yalyny ta berezy za zhorstkoho rezhymu vyprobuvan'. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Rivne: NUVHP, 2020. Vyp. 38. S. 321-330.
12. Homon S., Gomon P., Karavan V. Eksperymental'ni doslidzhennya khvoynykh ta lystyanykh porid derevyny odnorazovym korotkochasnym navantazhennyam na stysk vzdovzh volokon za zhorstkoho rezhymu vyprobuvan'. Visnyk L'vivs'koho



natsional'noho ahrarynoho universytetu. Arkhitektura ta sil's'kohospodars'ke budyvnytstvo. L'viv: LNAU, 2020. №21. S. 34–40.

13. Homon Sv.Sv., Matviyuk O.V., Kulakovs'kyy L.YA., Chornomaz N.YU. Do pobudovy povnykh diahram deformuvannya derevyny vil'khy ta yalyny za standartnoyi volohosti. Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya. Kyiv: KNUBA, 2022. Vyp. 79. S. 87–92.

14. Homon Sv.Sv., Homon Sv.St. Do vyznachennya deyakykh deformatyvnykh zakrytychnykh kharakterystyk derevyny. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli i sporudy. Rivne, 2022. Vyp. 41. S. 119-125.

15. Homon S.S., Homon Sv.Sv., Sasovs'kyy T.A. Prohnozuvannya zalyshkovoho chasu pratezdatnosti konstruktsiy z derevyny za povtornykh navantazhen'. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Rivne: NUVHP, 2015. Vyp. 31. S. 417–421.

16. Hrebenarova E., Wald F. (2022). Comparison of mechanical properties of the eldest larch wood construction with oak wood and spruce wood. *Wood research* 67(4), Pp. 612–624.

17. Celik E., Cengiz I., Yilmaz D. (2020). An experimental study on sustainability of historical wooden buildings exposed to open sea streams. *Wood research* 65(3), Pp. 521–530.

18. Xue S., Zhou H., Liu X., Wang W. (2019). Prediction of compression strength of wood usually used in ancient timber buildings by using resistograph and screw withdrawal tests. *Wood research* 64(2), Pp. 249-260.

### Література

1. Posta J., Ptacek P., Jara R., Terebesyova M., Kuklik P., Dolejs J. (2016). Correlations and differences between methods for non-destructive evaluation of timber elements. *Wood research* 61(1), Pp. 129-140.

2. Гайда С.В. Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної деревини ялиці з віком. *Лісове господарство, лісова, паперова та деревообробна промисловість*. Львів: ЛНТУ, 2017. Вип. 43. С.58-73.

3. Zachar M., Majlingova A., Mitterova I., Cabalova I. (2017). Influence of an age and damage of the oak wood on its fire risk. *Wood research* 62(3), Pp. 495-504.

4. De Mets, T., Tilmans, A. (2020). Evaluation of the risk of decay of wooden beams embedded in internally insulated walls by long-term measurements. *E3S Web of Conferences* 172, article number 01002.

5. Yang Y., Sun H., Yang S., Wang A., Zhao R., Wang W., He Y., Li B., Zhang B., Wu Q. (2021). Internal cause analysis of damage of wooden components in Danxia temple ancient architectures: tree species. *Wood research* 66(2), Pp. 297-308.

6. Landis E.N., Vasic, S., Davids W.G. Parrod, P. (2002). Coupled experiments and simulations of microstructural damage in wood. *Experimental Mechanics* 42, Pp. 389–394.

7. Zakic B.D. (1974). Inelastic bending of wood beams. *Journal of the Structural Division* 99(10), Pp. 2079-2092.

8. Patton-Mallory M., Cramer S. (1987). Fracture mechanics: a tool for predicting wood component strength. *Forest Products Journal* 37 (7/8), Pp. 39–47.

9. Green D.W., Kretschmann D.E. (1992). Properties and grading of Southern Pine Woods. *Forest Products Journal* 47 (9), Pp. 78–85.

10. Гомон Св.Св., Ясній П.В., Гомон П.С., Ясній В.П. Класична модель дійсної роботи суцільної та модифікованої деревини осьовим стиском вздовж волокон: монографія. Рівне: Волинські береги, 2023. 316 с.
11. Гомон С.С., Гомон П.С. Побудова дійсних діаграм механічного стану деревини « $\sigma$ - $\epsilon$ » суцільного перерізу ялини та берези за жорсткого режиму випробувань. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2020. Вип. 38. С. 321–330.
12. Гомон С., Гомон П., Караван В. Експериментальні дослідження хвойних та листяних порід деревини одноразовим короточасним навантаженням на стиск уздовж волокон за жорсткого режиму випробувань. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура та сільськогосподарське будівництво*. Львів: ЛНАУ, 2020. №21. С. 34–40.
13. Гомон Св.Св., Матвіюк О.В., Кулаковський Л.Я., Черномаз Н.Ю. До побудови повних діаграм деформування деревини вільхи та ялини за стандартної вологості. *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА, 2022. Вип. 79. С. 87–92.
14. Гомон Св.Св., Гомон Св.Ст. До визначення деяких деформативних закритичних характеристик деревини. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі і споруди*. Рівне, 2022. Вип. 41. С. 119-125.
15. Гомон С.С., Гомон Св.Св., Сасовський Т.А. Прогнозування залишкового часу працездатності конструкцій з деревини за повторних навантажень. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2015. Вип. 31. С. 417–421.
16. Hrebenarova E., Wald F. (2022). Comparison of mechanical properties of the eldest larch wood construction with oak wood and spruce wood. *Wood research* 67(4), Pp. 612-624.
17. Celik E., Cengiz I., Yilmaz D. (2020). An experimental study on sustainability of historical wooden buildings exposed to open sea streams. *Wood research* 65(3), Pp. 521-530.
18. Xue S., Zhou H., Liu X., Wang W. (2019). Prediction of compression strength of wood usually used in ancient timber buildings by using resistograph and screw withdrawal tests. *Wood research* 64(2), Pp. 249-260.

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМООБРОБКИ ПЛАСТИН ЛОКАЛЬНИМ НАГРІВАННЯМ І ОХОЛОДЖЕННЯМ

### IDENTIFICATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF PLATE HEAT TREATMENT BY LOCAL HEATING AND COOLING

Добрянський І.М., д.т.н., професор (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу), Добрянська Л.О., к.е.н., доцент (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу), Ільчук Н.І., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет)

**Dobryanskyi I.M., Doctor of Engineering., Professor (Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas), Dobryanska L.O., Ph.D. of Economics, Associate Professor (Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas), Pchuk N.I., Ph.D. of Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University)**

*Виконано співставлення достовірності результатів проведеного математичного моделювання для процесу термообробки пластинчатих систем при дії рухомих джерел нагріву. Описано та запропоновано підхід для визначення загальної кількості теплової енергії, яка може перерозподілятися у зварювальній пластині через локальний термічний вплив.*

*A comparison of the reliability of mathematical modeling results of the heat treatment plate systems by moving heating sources is made. An approach to determining the amount of thermal energy redistributed in the welding plate due to local thermal effects is proposed. Increasing requirements for the strength and durability of the relevant nodes and elements of welded structures, as well as the problem of saving metal and energy in the context of the transition to resource- and energy-saving technologies, determines the urgency of the task of determining the optimal parameters of low-temperature processing technology using moving sources and heat sinks. The continuous increase in the volume of welding work in industry and construction is inextricably linked with the development of ways to minimize residual stresses and deformations and their harmful effects on the quality and performance of welded structures. The analysis of known literary sources indicates insufficient study of the process of heat treatment using moving zones of heating and accompanying cooling and taking into account elastic-plastic deformations since this is associated with great difficulties of a mathematical nature associated with the mobility of thermal effects, the emergence of purely elastic zones, elastic-plastic and purely plastic deformations. The possibility of solving such problems is performed by numerical methods, namely: the method of finite differences, the method of finite elements, and the method of boundary*

*integral equations. Analytical methods that make it possible to construct solutions to such problems in a closed form can be used in calculations only under the condition of significant simplifications of the description of the deformation process, which introduces errors in establishing the real picture of the development of elastic-plastic deformations.*

*Ключові слова: пластина, зварний шов, параметри зварювання, термообробка, рухомі джерела нагріву, перерозподіл напружень.*

*Keywords: plate, weld seam, welding parameters, heat treatment, moving heating sources, stress redistribution.*

**Вступ.** Загальні вимоги до підвищення міцності та довговічності основних конструктивних вузлів та елементів у зварних конструкціях, а також проблема щодо економії металу та енергії в сучасних умовах використання різних ресурсо- та енергозберігаючих технологій, обумовлює актуальність задачі визначення оптимальних параметрів технології низькотемпературної обробки, яка передбачає можливість використання рухомих джерел та стоків тепла. Існуюче безперервне збільшення обсягів виконання зварювальних робіт як у промисловості так і в будівництві завжди нерозривно пов'язане з розробкою різних способів мінімізації залишкових напружень і деформацій та їх шкідливим впливом на якість і роботу зварних конструкцій. Трудність теоретичного вирішення даної проблеми (від постановки задачі до всебічного чисельного аналізу відповідних термопружнопластичних процесів) полягає насамперед у виборі ефективної розрахункової схеми визначення зон чисто пластичних деформацій.

**Аналіз останніх досліджень.** На сьогодні в літературі відома достатня кількість задач в пружній постановці, тобто без врахування пластичних деформацій. Термопружні розв'язки безумовно не визначають всю повноту розглядуваних процесів термообробки, однак, на думку вчених, дають важливе уявлення про якісну картину розподілу напружень залежно від рівня температури за умов термообробки. Крім того, пружний розв'язок, в подальшому є основою для аналізу пружно-пластичних зон.

Питанню застосування локальної термообробки зонами нагріву присвячено достатньо багато робіт [1-7], але не в повному обсязі представлено загальні результати для систематизованого підбору оптимальних параметрів та технології термообробки як з використанням рухомих джерел так і стоків тепла. Досить часто, розглядається лише схематично, що області розміщення рухомих джерел тепла повинні бути симетричними відносно зварювального шва, а ще додатково до здійснення нагріву доцільно також здійснювати охолодження шва.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить про недостатню вивченість процесу термообробки з використанням рухомих зон нагріву і супутнього охолодження та урахуванню при цьому пружно-пластичних

деформацій, оскільки це пов'язано з великими труднощами математичного характеру, пов'язаними з рухомістю теплового впливу, виникненню зон чисто пружних, пружно-пластичних та чисто пластичних деформацій. Розв'язування такого роду задач здійснюють переважно чисельними методами: методом скінчених різниць, методом скінчених елементів, методом граничних інтегральних рівнянь. Аналітичні методи, які дають можливість будувати розв'язки таких задач у замкнутому вигляді, можна застосовувати у розрахунках лише за умови суттєвих спрощень опису процесу деформування, що вносить похибки у встановленні реальної картини розвитку пружно-пластичних деформацій.

**Мета статті:** визначення загальних оптимальних параметрів проведення термообробки зварних пластин дією рухомими нормально-круговими джерелами тепла. Загальна прийнята схема для нагріву даного типу описує проведення термообробки тонких металевих листів, які мають повне вирівнювання температури по товщині, з рахунок полум'я газового нагрівача з віссю, яка є перпендикулярною до поверхні листа. Відповідно до поставленої мети вирішується наступне завдання: визначення чисельної оцінки для точності методики розв'язування задачі термопружності відносно локальної низькотемпературної термообробки пластин. Передбачено визначення оптимальних параметрів та досліджено ефективність вказаного способу зварювання пластин.

**Опис матеріалу досліджень.** Припускаємо, що усі джерела нагріву будуть переміщуватися зі сталою швидкістю  $v$ , а також вихідні поздовжні залишкові напруження  $\sigma_{xx}^{(0)}$ , які є в зоні зварного шва, а середня лінія співпадає з віссю  $Ox$ , і є розтягуючими, що набагато перевищують поперечні напруження  $\sigma_{yy}^{(0)}$ .

Згідно результатів роботи розподіл поздовжніх залишкових напружень  $\sigma_{xx}^{(0)}$  описується залежністю

$$\sigma_{xx}^{(0)} = \gamma \sigma_s^{(0)} \left(1 - y^2/b^2\right) e^{-y^2/(2b^2)}, \quad (1)$$

де  $\gamma$  – параметр, який змінюється в межах  $0 \leq \gamma \leq 1$ ;  $b$  – півширина зони розтягуючих напружень;  $\sigma_s^{(0)}$  – межа текучості матеріалу при кімнатній ( $t_0 = 20^\circ C$ ) температурі.

З метою більш ефективного пониження рівня поздовжніх залишкових напружень  $\sigma_{xx}^{(0)}$  в області основного зварного шва, локальну термообробку було здійснено для випадку симетрично-розміщених рухомих областей нагріву по відношенню до нього. Також були реалізовані умови, за яких в системі координат  $Oxyz$ , яка рухається разом

з основними джерелами нагріву, при цьому процес нагріву є встановленим, а існуючі центри зон нагріву було розміщено в точках з координатами  $(0, \pm d, h)$ , де  $d$  – це є віддаль центрів областей нагріву від середньої лінії зварного шва (осі  $Ox$ ),  $h$  – це є половина товщини пластини.

**Результати числових досліджень.** Оскільки пластичне течіння, яке призводить до загального зниження рівня існуючих залишкових зварних напружень, яке виникає в тих точках, де є сумарне значення для зварних  $\sigma_{ij}^{(0)}$  і тимчасових термопружних напружень  $\sigma_{ij}^{(t)}$  буде досягати значення межі текучості  $\sigma_s$ , то віддаль  $d$  потрібно вибирати за принципом: термопружні напруження, які виникають в зоні зварного шва, повинні бути розтягуючими і якомога більшими. Саме тому, а також беручи до уваги існуючі умови текучості Мізеса, робимо висновок, що віддаль  $d$  потрібно визначати, виходячи з умови, що в точках на зварному шві потрібно намагатися досягти максимальної різниці напружень  $\sigma = \sigma_{xx}^{(t)} - \sigma_{yy}^{(t)}$  при  $y = 0$ .

Виконано числові розрахунки оптимальних віддалей  $d_{op}$  в серединному січенні пластини  $z = 0$  при існуючих різних значеннях для параметрів  $Bi$ ,  $\nu$ ,  $a$  і розмірів для зони нагріву, яка характеризується радіусом  $r_*$ ; також було отримано наближене значення оцінки для ефективності термообробки, яку можна охарактеризувати параметром  $\varepsilon$ . Даний параметр є відношенням максимальної інтенсивності для температурних напружень на шві, а саме при  $y = 0$ , до максимуму інтенсивності температурних напружень в тих точках, які відповідають значенням оптимальних віддалей  $d_{op}$ , а саме при  $y = \pm d_{op}$ . З вище наведених даних випливає, що для більшого значення максимуму інтенсивності для термопружних напружень на шві, тобто для величини  $\sigma = \sigma_{xx}^{(t)} - \sigma_{yy}^{(t)}$  при  $y = 0$ , буде відповідати більш ефективна локальна термообробка. Всі отримані числові дані показують, що загальна ефективність локальної термообробки значно залежить від таких значень параметрів як:  $Bi$ ,  $\nu$ ,  $a$ , радіуса плями нагріву  $r_*$ . При цьому, при збільшенні тепловіддачі та радіуса  $r_*$ , але при зменшенні швидкості переміщення джерел нагріву, відбувається підвищення ефективності термообробки в цілому. Загальна ефективність локальної термообробки, як правило, залежить від виду самого матеріалу, що обумовлюється коефіцієнтом температуропровідності  $a$ . До прикладу: для пластин з титанового сплаву ВТ5, загальна ефективність термообробки є нижчою,

ніж для пластини зі сталі 09Г2С, а для пластини, яка виготовлена з алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6, вона є вищою.

За результатами проведених розрахунків, максимально допустима температура  $t_d^{(max)}$ , при якій виникають залишкові напруження розтягу, безпосередньо в зонах дії джерел нагріву, становить близько 170...195<sup>0</sup> С. Проведені дослідження показали також, що застосування сумісно з нагрівом додатково охолодження зварного шва дозволяє понизити існуючі залишкові розтягуючі напруження з наближенням до нуля, до наприкладу: при значенні  $Bi = 0,1$ .

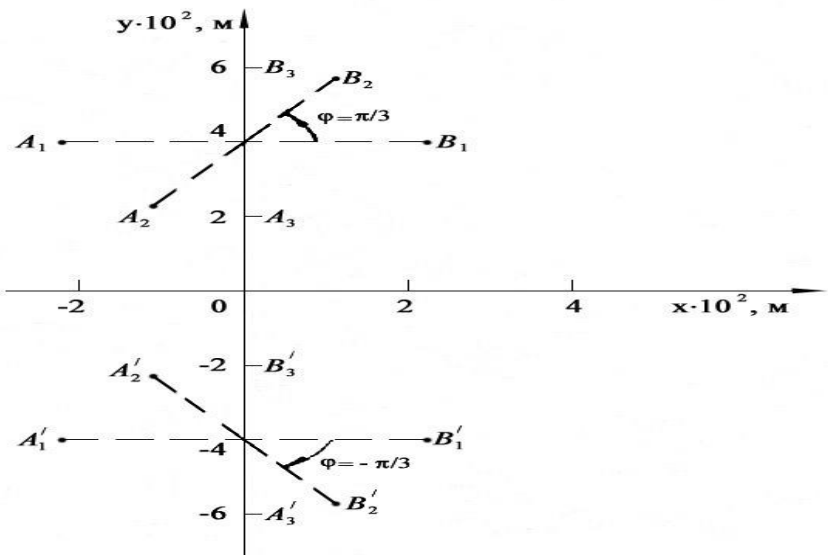


Рис. 1. Схема розміщення центрів рухомих джерел відносно середньої лінії зварувального шва пластини

Визначено (з урахуванням тепловіддачі) оптимальний кут нахилу  $\varphi_{opt}$  зон для розподілу джерел тепла у додатньому напрямку осі  $Ox$ . Для цього також необхідно виконати відповідні розрахунки для поздовжніх залишкових напружень, які виникають при термообробці нормально-круговими джерелами тепла, прийняту схему розміщення яких наведено на рис. 1. Графіки, які представлено на рисунку показують, що прийнятий

кут нахилу ( $\varphi = \pm\pi/3$ ) прямої, який з'єднує центри зон нагріву, у додатньому напрямку осі  $Ox$ , тобто напрямку руху джерел, є найбільш оптимальним.

Подано оцінку ефективності термообробки попередньо нагрітих (до рівномірної температури  $T_0$ ) зварних пластин рухомими нормально-круговими стоками тепла, яка характеризується поведінкою залишкових напружень в напрямку їх руху. Центр нормально-кругових стоків розміщується в початку рухомої системи координат, а вісь  $Ox$  суміщається з середньою лінією зварного шва. Вихідні дані для розрахунків взято наступні:  $T_0 = 200^0 C$ ;  $d = 0$ ;  $\gamma = 0,9$ ;  $b = 0,2$  м;  $\Delta\theta_0 = -15^0 C$ ;  $k_* = 2500$  1/м2. Товщина пластини складала  $h = 0,006$  м; розбиття області на елементарні прямокутники при використанні чисельного алгоритму, розробленого у працях вчених виконували за схемою:  $h_x^{(m)} = h_x = 0,01$  м;  $h_y^{(m)} = h_y = 0,004$  м.

Результати відповідних розрахунків залишкових поздовжніх напружень (віднесених до межі текучості при нульовій температурі) представлено графіками на рис. 2; точкам відповідає значення  $\theta_0 = \theta_0^{(max)}$ , при якому температура на самому зварному шві досягала своїх від'ємних значень.

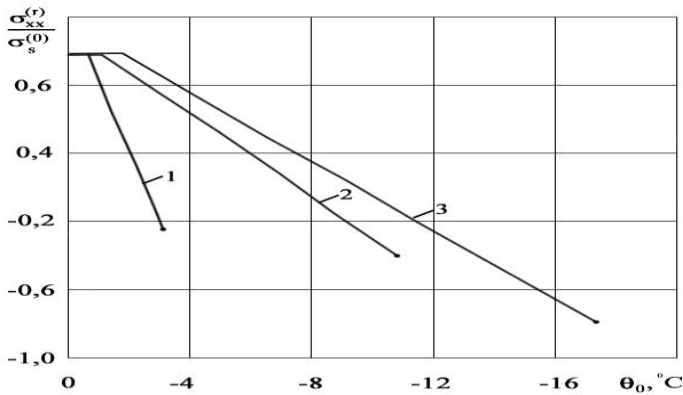


Рис. 2. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_{xx}^{(r)}$  у зварній пластині після виконання термообробки нормально-круговими стоками тепла, а саме:

- крива 1 –  $Bi = 1$ ,  $v = 0,004$  м/с;
- 2 –  $Bi = 0,1$ ,  $v = 0,004$  м/с;
- 3 –  $Bi = 0,1$ ,  $v = 0,008$  м/с



Також досить важливим чинником, який визначає процес термообробки зварних пластин, і досить суттєво впливає на загальну ефективність щодо процесу є ефективна теплова потужність зварювальної дуги, яку можна визначити за допомогою залежності:  $q = \eta IU$ , у ній  $\eta$  – це ефективний ККД для процесу нагріву;  $I$  – це є зварювальний струм;  $U$  – це є напруга дуги, погонна енергія зварювання, яка також характеризує загальну кількість теплоти зварювання, яка передається в одиницю довжини, прийнято 1 см, для однопрохідного шва або валика, яку визначають відповідно до залежності:  $q_p = q/v$ , у ній  $v$  – це є швидкість зварювання.

Погонна енергія є основним показником для формування вибору режиму зварювання, а основними параметрами, при яких здійснюється загальний підбір режиму зварювання, є струм і швидкість з якою переміщується зварювальна дуга.

Так як напруга дуги при виконанні зварювання змінюється у вузьких межах (20-36 в), то при розрахунках її величина не регламентується. Щодо інших параметрів, то швидкість зварювання пов'язана залежністю

$$v = \frac{\beta I}{\varphi F}, \quad (2)$$

а величина струму

$$I = \frac{v q_p}{0,24 \eta U} \quad (3)$$

У залежностях (2), (3) позначено:

$\beta$  – коефіцієнт наплавлювання, г/А·год;

$F$  – площа поперечного перерізу однопрохідного шва, мм<sup>2</sup>;

$\varphi$  – щільність наплавленого металу, г/мм<sup>3</sup>;

$\eta = 0,6 \div 0,85$ ,

0,24 – це є коефіцієнт, який враховує можливий вплив, який виникає при дії синусоїдальних кривих напруги і струму, на потужність дуги при умові виконання зварювання змінним струмом.

Відповідно до результатів проведених практичних робіт орієнтовні режими для ручного дугового зварювання прийнято узагальнювати даними, які пов'язують між собою як товщину прокатного профілю, так і діаметра електрода та значення для зварювального струму.

Для виконання побудови алгоритму щодо визначення основних параметрів термообробки в умовах дугового зварювання здійснюється шляхом задання граничного залишкового прогину  $f$  прокатного профілю,

що виникає в процесі виникнення термічних напружень, обумовлених як локальним термічним впливом, так і для порівняння його з розрахунковими даними, які було отримано на основі методик.

**Висновки.** Наведено результати проведеної чисельної оцінки точності методики щодо розв'язування задачі термопружності локальної низькотемпературної термообробки різних пластин. Визначено та проаналізовано загальні оптимальні параметри та досліджено ефективність даного способу зварювання. За результатами було встановлено, що збільшення тепловіддачі, а саме збільшення критерію Біо Ві, яке було досягнуто охолодженням рівномірно нагрітої пластини, також дає можливість не лише зняти, але і навести на зварному шві досить значні за величиною та ділянкою, де вони можуть зосереджуватися, а напруження стиску, які також суттєво підвищують як надійність, так і термін служби різних елементів зварних конструкцій. Слід зазначити, що при одних і тих же параметрах термообробки, усі залишкові напруження при зварюванні можна понизити до значно нижчого рівня, ніж вони були до початку процесу термообробки.

Також на основі заданого значення відносного прогину, як правило, визначають параметри для технологічного процесу зварювання, тобто підбирають діаметр електрода, напруги і сили струму. Після виконання наплавлення зварного шва, відповідно до згідно вказаної розрахункової схеми прокатний елемент практично не зазнає залишкового прогину, обумовленого полем залишкових напружень, що має місце в процесі локального термічного впливу.

Розроблена методика дає можливість здійснювати перерозподіл термічних напружень на фіксованих ділянках по довжині прокатного профілю з метою підвищення несучої здатності зварюваної пластинки.

## References

1. I.Dobryanskyu Mechanism of development of corrosion in concrete at low negative temperatures / I.Dobryanskyu, A. Hrytsevych // Architecture, and farm building: Bulletin of Lviv National Agrarian University – Lviv, 2006. №7 - P.84-87.
2. I.Dobryanskyu Deformation of concrete sto at low negative temperatures / I.Dobryanskyu, A. Hrytsevych // Architecture and farm building: Bulletin of Lviv National Agrarian University – Lviv, 2005. №6 - P.123-128.
3. A.Hrytsevych Influence of freeze-thaw temperature on the load-bearing capacity of steel-concrete beams / I.Dobryanskyu, Yu. Famuliak // Resource-saving materials, constructions, buildings and structures: Collection of scientific papers of the National University of Water and Environmental Engineering – Rivne, 2014. №29. – P.137-142.

4. A. Hrytsevych Selection rationale of the design diagram of steel concrete beam construction under conditions of periodic thermal influences A. Hrytsevych // Architecture and farm building: Bulletin of Lviv National Agrarian University – Lviv, 2017 №18 - P.97-103

5. Sala A. Radiant properties of materials / A. Sala. – Warsaw: Polish Sci. Publ., 1986. – 479 p.

6. Roźniakowski K. Some experimental results of laser beam interaction with a surface layer of brick / K. Roźniakowski, P. Klemm, A. J. Klemm // Building and Environment. – 2000. – Vol. 36, No. 4. – P. 485–491.

7. Griffith A. A. The theory of rupture / A. A. Griffith // Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech., Delft. – 1924. – P. 55–63.

### **Література**

1. Добрянський І.І. Механізм розвитку корозії бетону при низьких від'ємних температурах / Добрянський І.В., Грицевич А.В. // Архітектура та господарське будівництво: Вісник Львівського національного аграрного університету – Львів, 2006. №7 - С.84-87.

2. Добрянський І.Д. Деформація бетонної основи при низьких негативних температурах / І.Добрянський, А.Грицевич // Архітектура та господарське будівництво: Вісник Львівського національного аграрного університету – Львів, 2005. №6 - С.123-128.

3. Грицевич А.В. Вплив температури замерзання-відтавання на несучу здатність сталобетонних балок / І.Добрянський, Ю.В. Фамуляк // Ресурсозберігаючі матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць НУВГІ – Рівне, 2014. №29. – С.137-142.

4. Грицевич А.А. Обґрунтування вибору розрахункової схеми сталобетонної балкової конструкції в умовах періодичних теплових впливів Грицевич А.А. // Архітектура та господарське будівництво: Вісник Львівського національного аграрного університету – Львів, 2017 №18 - С.97-103.

5. Сала А. Випромінювальні властивості матеріалів / А. Сала. – Варшава: Польська наук. опубл., 1986. – 479 с.

6. Roźniakowski K. Деякі експериментальні результати взаємодії лазерного променя з поверхневим шаром цегли / K. Roźniakowski, P. Klemm, A. J. Klemm // Building and Environment. – 2000. – Вип. 36, № 4. – С. 485–491.

7. Гріффіт А. А. Теорія розриву / А. А. Гріффіт // Тез. 1-й міжн. Конгр. апл. Механіка, Делфт. – 1924. – С. 55–63.

## КОНВЕКТИВНИЙ ТЕПЛОБМІН ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОГО РОЗТРИСКУВАННЯ БЕТОННИХ ЗРАЗКІВ ЗА ДІЇ ЛАЗЕРНОГО ОПРОМІНЕННЯ

### CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN THE STUDY OF THERMAL CRACKING OF CONCRETE SAMPLES UNDER LASER IRRADIATION

Добрянська Л.О., к.е.н., доцент (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу), Добрянський І.М., д.т.н., професор (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу), Ільчук Н.І., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет)

**Dobryanska L.O., Ph.D. of Economics, Associate Professor (Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and gas), Dobryanskyi I.M., Doctor of Engineering., Professor (Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas), Iychuk N.I., Ph.D. of Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University)**

*В дослідженнях використано схему побудови розв'язку незв'язаної задачі квазістатичної термопружності для півбезмежного тіла за змішаних граничних умов, що піддається нагріванню в обмеженій області граничної поверхні тепловим потоком і на основі виконаного розв'язку проведеного обґрунтованого підходу до здійснення розрахунку необхідних параметрів для терморозтріскування, який проведено з використанням критеріального рівняння (Грифітса та МакКлінтока-Велша) з механіки крихкого руйнування. Загальна схема була випробувана на бетонних зразках двох різних типів, які мали різну міцність на стиск.*

*The research used a scheme for constructing a solution to an uncoupled problem of quasi-static thermoelasticity for a semi-infinite body under mixed boundary conditions, which is subject to heating in a limited region of the boundary surface by a heat flux, and based on the constructed solution, an approach to calculating the parameters of thermal separation was developed, which uses criterion levels. (Griffiths and McClintock-Welsh) mechanics of brittle fracture. The scheme was tested on concrete samples of two types with different compressive strengths.*

*The effect of forced cooling on the thermal stress state in deformable solids under the conditions of action of concentrated heat flows was studied in works, where the conditions under which the effect of cooling is significantly felt are established.*

*Experimental studies of temperature regimes have shown that in the absence of forced cooling systems, the heat transfer in the process of short-term (with Fourier numbers less than ten) heating can be less than 5% of the total amount of heat received.*

*The general results can also be the basis for further research on the influence of different laser sources on the processes of heat treatment of building materials and structures.*

*A review of the works in which approaches to finding the non-stationary temperature and quasi-static temperature stresses in a half-space with a uniform thermal flow of heat were initiated show that the surface outside the contact area is thermally insulated. However, taking into account convective heat transfer shows the problem more precisely.*

*It is necessary to consider the general order of construction of the solution to the problem of quasi-static unbound thermoelasticity for a semi-infinite body heated by a uniformly distributed heat flux under mixed boundary conditions.*

*Next, on this basis, we will present an approach to the calculation of parameters of laser thermal cracking, which uses some criterion equations of the mechanics of brittle fracture.*

*Ключові слова: конвективне охолодження, температура, температурні напруження, концентровані теплові потоки, критеріальні рівняння механіки крихкого руйнування, бетон.*

*Keywords: convective cooling, temperature, temperature stresses, concentrated heat flows, criterion equations of brittle fracture mechanics, concrete.*

**Постановка проблеми.** Загальний вплив примусового охолодження на термонапружений стан, який виникає у деформівних твердих тілах, які можуть або перебувають в умовах дії різних концентрованих теплових потоків, було досліджено у працях [1–6], де було встановлено умови, за яких суттєво відчутним був вплив охолодження. Експериментальні дослідження температурних режимів показали, що при відсутності систем примусового охолодження тепловіддача в процесі короткочасного (для чисел Фур'є менше десяти) нагрівання складає значно менше, ніж 5% від загальної кількості тепла, яке виділяється. Таке припущення буде тим точніше, чим меншим за значенням буде число Рейнольдса для повітряного потоку, який обтікає тіло. Саме тому, адиабатичність вільної поверхні для контактуючих тіл буде вносити значні спрощення до процесу розв'язання теплової задачі. Для проведення оцінки по максимальній величині критерію Біо  $Bi = ha / K$  при обтіканні сфери радіуса  $R$  повітрям можна скористатись даними роботи [6]. Коефіцієнт тепловіддачі  $h$  може бути знайденим за критерієм Нуссельта  $h = (K_b / R)Nu$ , де  $K_b = 0,025 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  - теплопровідність сухого повітря при температурі 20 0С. Отже  $Bi = (K_b a / KR)Nu$ . При вимушеній конвенції повітря критерій Нуссельта є функцією числа Рейнольдса  $Re$  і виражається емпіричною залежністю:

$Nu = 2 + 0,027 Re^{0,54} + 0,312 Re^{0,58}$ . При цьому максимальне значення для числа Рейнольдса, при дослідженні фізичних процесів та технічних явищ в машинобудуванні, не перевищує 108. При  $Re = 10^8$  з формули для числа Нуссельта знаходимо  $Nu = 1,41 \cdot 10^4$ . Покладаючи, що сфера виготовлена з низьколегової сталі з середнім значення коефіцієнта теплопровідності  $K = 20$  Вт/(м·оС) і приймаючи до уваги, що при локальному контакті в рамках теорії Герца  $a/R < 0,1$ , з виразу для числа Біо було отримано, що  $Bi < 1,8$ . Слід зазначити, що дана оцінка була отримана із значним запасом в сторону до збільшення, так як, по-перше: теплопровідність для більшості сталей є вища від прийнятої; а по-друге: як правило  $Re < 10^6$ .

**Аналіз досліджень і публікацій.** При проведенні огляду робіт, у яких було започатковано різні підходи до визначення нестационарної температури та квазістатичних температурних напружень саме у півпросторі, який має неоднорідний тепловий потік тепла, було вказано, що поверхня, яка знаходиться поза ділянкою контакту є теплоізолюваною. Однак, при врахуванні конвективного теплообміну більш точніше відображає існуючу проблему.

**Мета статті.** Розглянути процедуру для побудови розв'язку задачі з квазістатичної незв'язаної термопружності, яка діє для півбезмежного тіла, яке нагрівається під впливом рівномірно розподіленого теплового потоку у змішаних граничних умовах. Потім на цій основі подано підхід щодо розрахунку параметрів лазерного терморозтріскування, який може використовувати деякі критеріальні рівняння механіки для крихкого руйнування. Саме для цього, на основі визначеного нестационарного розподілу температури потрібно знати квазістатичний термонапружений стан для півбезмежного тіла, яке нагрівається в круговій області граничної поверхні при дії теплового потоку і має нормальний (гаусовим) розподіл потужності.

Відповідно до поставленої мети вирішується наступне **завдання**:

- вивчення процесів термовідколювання на початкових стадіях нагрівання в околі зони центру плями нагріву;
- посилення відколювання складових бетону в напрямку від кратера при подальшому опроміненні лазером.

Вивчення процесів термовідколювання на початкових стадіях нагрівання в околі зони центру плями нагріву.

Для визначення нестационарного температурного поля  $T(r, z, t)$  у системі в будь-якій довільній точці  $0 \leq r \leq \infty, 0 \leq z \leq \infty$  та у момент часу  $t > 0$  в загальному припущенні, що загальні теплофізичні властивості не залежать від температури, можемо отримати рівняння нестационарної

теплопровідності, а також нульову початкову умову, та умови зникнення безмежності та загальну змішану граничну умову на поверхні:

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = \begin{cases} -q, & r \leq a, z = 0, \\ hT, & r > a, z = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Розв'язок відповідної задачі для теплопровідності при заданій умові (1) не знайдено, тому вирішення даної проблеми саме в математичному плані є доволі складною. Розглянемо побудову цієї задачі, використовуючи деякі припущення. Заміняємо умову (1) на таку

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = -qH(a-r) + hT \quad \text{при} \quad r \geq 0, z = 0. \quad (2)$$

Суть пропонованого методу полягає в наступному. Замінімо температуру в правій частині умови (2) в області нагріву  $0 \leq r \leq a$  середньою температурою в цій області у відповідності до формули

$$\theta = \frac{2}{a^2} \int_0^a T(r, 0, t) r dr \quad (3)$$

Тоді з використанням (3) матимемо таку умову

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = -q + h\theta \quad \text{при} \quad 0 \leq r \leq a, z = 0. \quad (4)$$

Умова (4) співпадає з умовою (1) в області нагріву з точністю до деякого сталого множника  $\lambda$ , який слід вибрати із залежності

$$-q = \lambda(-q + h\theta) \quad (5)$$

Тоді на основі (5) матимемо

$$\lambda = \frac{1}{1 - h\theta/q} > 1 \quad (6)$$

Тому, наближений розв'язок вихідної змішаної задачі теплопровідності можна представити як

$$T(r, z, t) = \lambda T_0(r, z, t), \quad (7)$$

де  $T_0(r, z, t)$  є розв'язком рівняння нестационарної теплопровідності при сформульованій граничній умові (2). Ввівши безрозмірні змінні  $\rho = r/a$ ,  $Z = z/a$ ,  $Fo = kt/a^2$ ,  $\Lambda = q_0 a / K$  запишемо крайову задачу для знаходження розподілу  $T_0(r, z, t)$

$$\frac{\partial^2 T_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_0}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 T_0}{\partial Z^2} = \frac{\partial T_0}{\partial Fo}, \quad \rho \geq 0, Z \geq 0, Fo > 0 \quad (8)$$

$$T_0(r, z, 0) = 0, \quad T_0(\infty, z, t) = T_0(r, \infty, t) = 0 \quad (9)$$

$$K \frac{\partial T_0}{\partial Z} = -\Lambda H(1-\rho) + BiT_0 \quad \text{при } \rho \geq 0, Z = 0, \quad (10)$$

де для  $\lambda$  із (6) отримуємо  $\lambda = \frac{1}{1-Bi\theta/\Lambda} > 1$ , причому згідно залежності (3) матимемо

$$\Theta = 2 \int_0^1 T(r, 0, t) \rho \, d\rho \quad (11)$$

Розв'язок для сформульованої крайової задачі може бути побудовано з використанням інтегральних перетворен, а саме: застосування інтегрального перетворення Ганкеля по радіальній координаті  $\rho$ , а також інтегрального перетворення Фур'є по узагальненому тригонометричному ядрі по змінній  $Z$  для виду  $N(Z, \zeta) = \zeta \cos(\zeta Z) + Bi \sin(\zeta Z)$  [6, 7], що дає наступний вираз для розв'язання вихідної крайової у задачі (8)–(10)

$$T_0(r, z, t) = \Lambda \int_0^\infty \xi \varphi(\xi) \Phi_0(\xi, Z, Fo) J_0(\xi \rho) d\xi, \quad (12)$$

$$\Phi_0(\xi, Z, Fo) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \frac{N(Z, \zeta)}{\zeta^2 + Bi^2} \tilde{\Phi}_0(\xi, \zeta, Fo) d\zeta$$

Саме тому, розв'язок (12), для змішаної задачі теплопровідності, було записано у вигляді інтеграла Ганкеля, який містить певну невідому поки що функцію, і яку було записано як інтеграл Фур'є. Для розв'язку задачі, було використано довідкові дані як при обчисленні інтегралів, так і при формулюванні відповідної задачі згідно методики, яку викладено у роботах [3, 6], отримано такий вираз:

$$\begin{aligned} \Phi_0(\xi, Z, Fo) = & \frac{1}{2} \left[ \frac{e^{-\xi Z}}{Bi + \xi} \operatorname{erfc} \left( \frac{Z}{2\sqrt{Fo}} - \xi\sqrt{Fo} \right) + \frac{e^{\xi Z}}{Bi - \xi} \operatorname{erfc} \left( \frac{Z}{2\sqrt{Fo}} + \xi\sqrt{Fo} \right) \right] - \\ & - \frac{Bi e^{BiZ}}{Bi^2 - \xi^2} e^{(Bi^2 - \xi^2)Fo} \operatorname{erfc} \left( \frac{Z}{2\sqrt{Fo}} + Bi\sqrt{Fo} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Стаціонарна температура в центрі круга нагрівання ( $\rho=0, Z=0$ ) при  $Fo \rightarrow \infty$  на основі співвідношень (11)–(13) визначається так

$$\begin{aligned} T_0(0, 0, \infty) &= \Lambda \int_0^\infty \frac{J_1(\xi)}{Bi + \xi} d\xi = \\ &= \Lambda \left\{ 1 + \frac{1}{Bi} + \frac{\pi}{2} [Y_1(Bi) - H_1(Bi)] \right\} \end{aligned}$$



Сталий множник  $\lambda$ , який залежить від параметра Біо та значення усередненої температури в області нагріву, знаходився на основі отриманих співвідношень чисельним шляхом.

Після перемноження знайденої температури  $T_0$  (12), яка відповідає випадку теплообміну по всій граничній поверхні, на множник  $\lambda$  було отримано необхідний температурний розподіл, який і буде відповідати розв'язку для вихідної задачі без врахування теплообміну в області нагріву.

При знаходженні відповідного термонапруженого стану, обумовленого нестационарним температурним розподілом (12), було застосовано залежність осесиметричної квазістатичної задачі термопружності, де загальне напруження було виражено через термопружний потенціал для переміщень  $\Psi$  та за функцією Лява  $L$ .

Повне поле квазістатичних температурних напружень  $\sigma_{ij}^t$  отримуємо суперпозицією напружень, що відповідають потенціалу переміщень  $\Psi$  та функцію Лява. Після проведення необхідних перетворень представимо їх вирази у вигляді

$$\sigma_{ij}^* = \int_0^{\infty} \varphi(\xi) S_{ij}(\xi, \rho, Z, Fo) d\xi - T^* \varepsilon_{ij}, \quad (14)$$

причому величини  $S_{ij}(\xi, \rho, Z, Fo)$  визначаються через дві функції  $\Phi_1(\xi, Z, Fo)$  і  $\Phi_2(\xi, Z, Fo)$ , які визначені у роботі.

### **Посилення відколювання складових бетону в напрямку від кратера при подальшому опроміненні лазером**

Метод керованого лазерного терморозколювання отримав теоретичне обґрунтування. Загальна розрахункова схема методу має такий вид: визначення температурного поля, яке виникає у результаті дії опромінення на поверхню термопружного тіла тепловим потоком, що діє на ділянці, яка має радіус  $a$  граничної поверхні. За умови перевищення градієнтом температурного значення термостійкості матеріалу визначаються оптимальні параметри для процесу лазерного терморозтріскування, а саме: віддалі від границі лазерної плями до фронту охолодження та інші.

Зазначену математичну модель для осесиметричної квазістатичної задачі термопружності, яка враховує конвективний теплообмін з оточуючим середовищем, було використано для числового моделювання терморозтріскування різних конструктивних матеріалів.

При виконанні побудови чисельного алгоритму було вивчено зародження зон, таких як передруйнування і терморозтріскування для звичайного бетону (вид I,  $\sigma_c = 30$  МПа) та бетону підвищеної міцності (вид II,  $\sigma_c = 65$  МПа), було використано числові дані термопружних параметрів. При обчисленнях було прийнято, що густина теплового потоку, емітованого лазером, змінювалась за нормальним законом, а коефіцієнт теплового поглинання складав  $A = 0,6$ .

Як показують числові дослідження головних напружень, обчислених з використанням залежностей (14), напруження  $\sigma_1$  є додатнім, тобто розтягуючим, і досягає свого найбільшого значення в точці  $z \approx 0,1$  мм; тоді як головне напруження  $\sigma_3$  є стискаючим в зоні  $0 \leq z \leq 0,06$  мм і для значень глибини  $z > 0,06$  мм воно повністю зникає.

Підставляючи величини  $\sigma_1$  і  $\sigma_3$  в критеріальні рівняння і здійснюючи відповідні розрахунки, встановлено, що виникає три зони напруженого стану, обумовлені лазерним опроміненням. В області  $0 \leq z \leq 0,02$  мм, тобто безпосередньо під нагрітою поверхнею, загальний напружений стан було визначено за умовою McClintock-Walsh, яка передбачає руйнування стиском. В зоні  $0,02 \leq z \leq 0,05$  мм визначальними є зсувні напруження, які знаходяться у відповідності до модифікованого критерія Griffith. Область розтягуючих напружень розміщується нижче за  $z > 0,05$  мм; в цій області використовується класичний критерій Griffith.

Для набору параметрів, який використовується при числовому аналізі, дія розтягуючих напружень виявляється в зоні  $z > 0,05$  мм і при цьому визначальними при оцінці стану передруйнування є головні напруження.

В межах зони розтягу ( $z > 0,05$  мм), поверхня, по якій відбувається розкол, відповідає тій координаті по глибині, де головне напруження досягає межі міцності конкретного матеріалу. Відповідні траєкторії попереднього передруйнування (тобто зародження і росту розколу матеріалу) при значенні  $\sigma_T / C = 0,63 \cdot 10^{-3}$  для звичайного бетону (тип I) і  $\sigma_T / C = 0,72 \cdot 10^{-3}$  для стійкішого бетону (тип II) представлено на рис. 1. Враховуючи, що попередній ріст тріщини відбувався по нормалі у напрямку дії саме основного головного напруження, то і поверхні, які мають однаковий рівень напружень, і які є перпендикулярними саме до напрямку дії головного напруження, що виникає в кожній точці бетонного масиву, являються поверхнями, по яких відбувається відкол. Загальна

величина для приведенного головного напруження співпадає з глибиною, тому всі криві для еквівалентних напружень в умовах їх одноосного деформування при розтягненні бетону, визначають максимально можливе поширення тріщини.

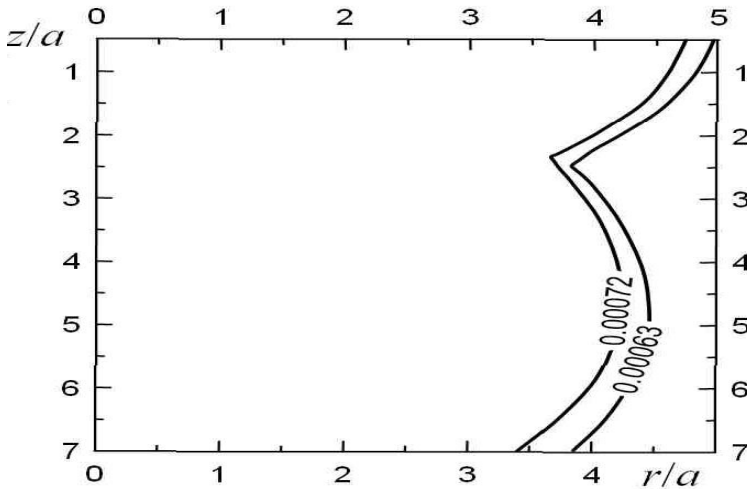


Рис. 1. Поверхня, по якій відбувається розкол: для звичайного бетону (тип I), для стійкішого бетону (тип II)

**Висновки.** Розглянута модель терморозтріскування підтверджує, що усі процеси термовідколювання можуть відбуватися лише на початкових стадіях нагрівання в околі зони центру плями нагріву. Відкол складових бетону в напрямку від кратера може посилюватись при подальшому опроміненні лазером. Загальний числовий аналіз показав, що температури в околі зони дії лазера, також можуть сягати значень близько кількох тисяч градусів за Цельсієм, які значно перевищують встановлені відповідні величини температур фазового переходу для складових бетону. Саме це свідчить, що явище відколювання матеріалу можливе на площі діаметром від 1 до 2 мм.

Всі отримані результати також можуть стати основою для подальшого вивчення ефектів дії лазерних джерел при виконанні процесів термообробки різних будівельних матеріалів та конструкцій.

#### References

1. I.Dobryansky Mechanism of development of corrosion in concrete at low negative temperatures / I.Dobryansky, A. Hrytsevych // Architecture, and farm building: Bulletin of Lviv National Agrarian University – Lviv, 2006. №7 - P.84-87.

2. I.Dobryansky Deformation of concrete sto at low negative temperatures / I.Dobryansky, A. Hrytsevych // Architecture and farm building: Bulletin of Lviv National Agrarian University – Lviv, 2005. №6 - P.123-128.

3. A.Hrytsevych Influence of freeze-thaw temperature on the load-bearing capacity of steel-concrete beams / I.Dobryansky, Yu. Famuliak // Resource-saving materials, constructions, buildings and structures: Collection of scientific papers of the National University of Water and Environmental Engineering – Rivne, 2014. №29. – P.137-142.

4.A.Hrytsevych Selection rationale of the design diagram of steel concrete beam construction under conditions of periodic thermal influences A. Hrytsevych // Architecture and farm building: Bulletin of Lviv National Agrarian University – Lviv, 2017 №18 - P.97-103

5. Sala A. Radiant properties of materials / A. Sala. – Warsaw: Polish Sci. Publ., 1986. – 479 p.

6. Roźniakowski K. Some experimental results of laser beam interaction with a surface layer of brick / K. Roźniakowski, P. Klemm, A. J. Klemm // Building and Environment. – 2000. – Vol. 36, No. 4. – P. 485–491.

### **Література**

1. Добрянський І.І. Механізм розвитку корозії бетону при низьких від'ємних температурах / Добрянський І.В., Грицевич А.В. // Архітектура та господарське будівництво: Вісник Львівського національного аграрного університету – Львів, 2006. №7 - С.84-87. .

2. Добрянський І.Д. Деформація бетонної основи при низьких негативних температурах / І.Добрянський, А.Грицевич // Архітектура та господарське будівництво: Вісник Львівського національного аграрного університету – Львів, 2005. №6 - С.123-128.

3. Грицевич А.В. Вплив температури замерзання-відтавання на несучу здатність сталобетонних балок / І.Добрянський, Ю.В. Фамуляк // Ресурсозберігаючі матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць НУВГП – Рівне, 2014. №29. – С.137-142.

4.Грицевич А.А. Обґрунтування вибору розрахункової схеми сталобетонної балкової конструкції в умовах періодичних теплових впливів Грицевич А.А. // Архітектура та господарське будівництво: Вісник Львівського національного аграрного університету – Львів, 2017 №18 - С.97-103.

5. Сала А. Випромінювальні властивості матеріалів / А. Сала. – Варшава : Польська наук. опубл., 1986. – 479 с.

6. Roźniakowski K. Деякі експериментальні результати взаємодії лазерного променя з поверхневим шаром цегли / K. Roźniakowski, P. Klemm, A. J. Klemm // Building and Environment. – 2000. – Вип. 36, № 4. – С. 485-491.

## ВИЗНАЧЕННЯ МАРКИ ЦЕГЛИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОЕФІЦІЄНТА ПЕРЕХОДУ

## DETERMINATION OF THE BRICK BRAND USING THE TRANSITION COEFFICIENT

**Задорожнікова І., к.т.н., доцент, Савенко В.І., к.т.н., професор (Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ), Ужегова О.А., к.т.н., доцент, Ротко С. к.т.н., доцент, Чапук О.С. к.т.н., доцент (Луцький національний технічний університет)**

**Zadorozhnikova I., Ph.D., Associate Professor, Savenko V.I., Ph.D. in Engineering, Professor (Kyiv National University of Construction and Architecture), Uzhehova O., Ph.D., Associate Professor, Rotko S., Ph.D., Associate Professor, Chapiuk O., Ph.D., Associate Professor (Lutsk National Technical University)**

*У роботі визначено фактори, які впливають на формування коефіцієнтів переходу, що отримані при різних методах проведення досліджень. та їх порівняльні характеристики.*

*Ceramic brick is one of the first places among other building materials. Accordingly, in order to guarantee the reliability of the work of brick structures, as well as to improve their strength characteristics, it is necessary to conduct a study of bricks.*

*Traditional methods and means of brick testing were used in the research process. The technique of conducting experiments provided:*

*1. Classical test.*

*The mark of bricks and stones is established by the results of their test for compressive strength and bending for all types of bricks produced in accordance with DSTU B B.2.7-248: 2011.*

*2. Tests by simplified methods.*

*The simplified test method is based on the classical method according to DSTU.B. B.2.7-248: 2011.*

*Testing process.*

*The tests were carried out in accordance with the requirements.*

*Research results*

*A chart of indicators of the difference of the transition coefficients was developed, as well as protocols for testing the bricks.*

*Conclusions and evaluation of the results obtained*

*Experimentally examining three methods of brick destruction, determined that the most effective and accurate way is to study samples with an intermediate rubber plate.*

*The advantages of this method are the less time spent on the preparation of samples and increased efficiency of the use of technical and material resources, namely the technical rubber woven plate.*

*When calculating the coefficients of the transition from the compressive strength of the conventional method to the compressive strength of the simplified method, we found that this coefficient of test samples is affected by the method of connection, namely the type of material used in the experiment. In the example of cement-sand compound, we can observe that the coefficient is influenced by the type and quality of sand and the water-cement ratio.*

*Therefore, it follows from the results the study that the conversion factor greatly simplifies the definition of the brand of brick.*

*Ключові слова: цегла керамічна, марки цегли, коефіцієнт переходу*

*Keywords: ceramic brick, grades of brick, conversion factor.*

Керамічна цегла рядова займає 1-е місце серед інших будівельних матеріалів щодо застосування. Якісні показники фізико-механічних властивостей цегли, що застосовується для зведення промислових будівель і споруд так і житлових, зумовлюють високий рівень безпеки та комфорту. Міцність цегли це її основна характеристика [3]. Від якості цегли та, відповідно, цегляної кладки, що використовується в несучих конструкціях будівель та споруд, залежить не тільки термін її нормальної експлуатації, але людське життя.

Задля гарантії надійності роботи цегляних конструкцій та покращення їх міцнісних характеристик необхідно проводити дослідження цегли. У зв'язку з цим, для забезпечення тривалої експлуатації будівель та споруд є необхідність обстеження та своєчасного визначення стану конструкцій та матеріалів, з яких вони зведені, їх фізико-механічних характеристик.

На сьогодні, під час обстеження цегляних, кам'яних та армокам'яних конструкцій будівель та споруд, широко застосовують методи неруйнівного та руйнівного контролю в процесі збору вихідних даних для розрахунку [1]. Сучасні неруйнівні методи випробувань дозволяють диференційовано, в будь-яких кількості та зонах отримувати інформацію щодо особливостей структури цегли та кладки в досліджуваних спорудах. Вони більш прийнятні з фінансового погляду, тому, що не потребують відбору досліджуваних зразків для подальших досліджень. А це не призводить до погіршення зовнішнього вигляду досліджуваних будівель та її послаблення, оскільки місця вичинки є концентраторами напружень, які залишились після відбору зразків для досліджень. Однак є теорії окремих фахівців, які вважають, що застосування неруйнівних методів контролю на основі ультразвуку не є допустимим, оскільки вони дозволяють лише приблизно оцінити міцність

цегли, а отримані результати характеризуються, здебільшого, великою похибкою.

Механічні випробування, відносяться до руйнівних методів. Вони є найбільш трудомісткими та дорогавартісними, оскільки потребують відбору певної кількості зразків цегли з тіла кладки [2, 6].

Використані традиційні засоби та способи випробування цегли в процесі дослідження.

### **Методики проведення досліджень**

#### **Випробування за класичним методом**

Відповідно до [5] марка цегли і керамічних каменів встановлена за результатами їх випробування на міцність при стиску і вигині. Випробування проведено на вологих зразках. При цьому вони повинні задовольняти вимогам стандарту [4], відповідно, дослідні зразки, відбирали для випробувань за зовнішнім виглядом, враховуючи наявність дефектів і зовнішній вигляд.

Визначили границю міцності при стиску цегли на зразках виготовлених з двох цілих цеглин за стандартною схемою підготовки цегляних зразків до випробування на міцність.



Рис. 1. Випробування дослідного зразка за класичною методикою на стандартному цементно-піщаному розчині

#### **Випробування спрощеними методами**

З метою збільшення точності визначення марки керамічної цегли, як альтернативу стандартному методу випробування на міцність було досліджено спрощений метод. Який проводили відповідно до [5] на базі класичного методу.

Даний метод полягає в тому, що використовуємо, в якості проміжної прокладки для дослідних зразків, такі матеріали як технічна повсть з наступними структурно-фізичними показниками ( $\delta=10$  мм та 5 мм,  $\rho m = 450$  кг/м<sup>3</sup>) і технічна резинотканева пластина, в якій на кожні 2 мм не

більше одного шару тканини ( $\delta=10$  мм та 5 мм,  $\rho_{тн} = 1500$  кг/м<sup>3</sup>). Кожен дослідний зразок виготовлено з двох цеглин, які розміщували одна над одною та трьох проміжних прокладках певної товщини, передбаченої для даної серії зразків. Прокладки, що імітували в даному випадку цементно-піщаний розчин розміщували над цеглою та під нею, в контакт з плитою преса, та між цеглинами відповідно. Схеми випробувань показана на рис. 2 та рис.3. Зразки відібрані для випробувань, як і для випробування за класичним методом, за зовнішнім виглядом, при якому наявні дефекти повинні задовольняти вимогам стандарту [4].

Перед випробуванням, партія цегли для досліджень, що була привезена замовником, знаходилась в приміщенні лабораторії 24 години при температурі  $(20 \pm 5)^\circ \text{C}$ .

Відмінність спрощення даного методу від традиційного полягає в тому, що зразки необхідно витримати в приміщенні лише добу, а також у швидкості та простоті підготовки зразків до проведення випробувань.



Рис. 2. Схема розміщення зразка на плиті гідравлічного пресу з використанням проміжних пластин технічної повсті



Рис. 3. Схема розміщення дослідних зразків на плиті гідравлічного пресу з використанням резинотканевих пластин



### Проведення випробувань

Випробування проведено згідно з вимогами [4]. Для проведення дослідів використано такі основні вимірювальні прилади: гідравлічний прес ИП-1000 та ПСУ-125 з ціною поділки 2 кН. Преси повірено в ДП „Волиньстандартметрологія” в установленому порядку.

Випробування зразків проведено в такій послідовності. Зразки, для обчислення площі їх робочої поверхні, виміряли з точністю до 1 мм. Площу поперечного перерізу зразка обчислювали як середнє арифметичне значення площ.

На бічних поверхнях зразків наносили вертикальні осі, для їх центрування на плити преса. Зразок притискали верхньою плитою преса. Швидкість подачі навантаження була такою, що руйнування дослідного зразка відбулося після початку випробувань через 20-60 с.

Границі міцності при стиску випробуваної партії цегли обчислили з точністю 0,1 МПа, як середнє арифметичне значення, п'яти зразків з однієї партії, отриманих результатів випробування.

Провели випробування на двох пресах, усі дані порівняли, значення внесли у таблиці.

Для дослідів використовували підготовлені зразки з цегли двох заводів: ПП «Захід» цегельний завод с. Павловичі Волинської області, «Дубеченський керамічний завод» Волинської області.

Для кожного з способів дослідження було сформовано партії по 5 зразків, всього використовували 4 партії, тобто по 20 зразків.

Процеси випробувань зразків цегли представлено на рис.4 .



Рис. 4. Підготовка, встановлення та руйнування дослідного зразка на пресі

### Результати досліджень

На підставі отриманих результатів, було розроблено діаграму показників різниці коефіцієнтів, на прикладі двох способів на рис.5., а також, подано протоколи щодо випробування звичайної керамічної цегли. Для кожної партії цегли, відповідного заводу виробника, подано протоколи із застосуванням різних проміжних прокладок.

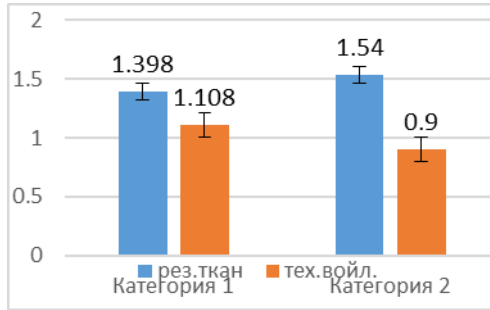


Рис. 5. Діаграма показників різниці коефіцієнтів переходу.

Випробовано зразки цегли виробника ПП «Захід» Цегельний завод у с. Павловичі, Волинська область

1. Випробовували цеглу керамічну порожнисту рядову розмірами 250x120x65 мм, з'єднану цементно-піщаним розчином.

Загальне середнє значення границі міцності на стиск визначили за формулою:

$$R_{\text{сер}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 126,68 \text{ кгс/см}^2$$

2. Випробовували цеглу керамічну пустотілу рядову розмірами 250x120x65 мм, в якості проміжних прокладок застосовували технічну повсть.

Загальне середнє значення границі міцності цегли на стиск визначили за формулою:

$$R_{\text{сер}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 139,72 \text{ кгс/см}^2$$

3. Випробовували цеглу рядову порожнисту керамічну розмірами 250x120x65 мм, в якості проміжних прокладок застосовували резинотканеву пластину.

Загальне середнє значення границі міцності на стиск визначили за формулою:

$$R_{\text{сер}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 81,54 \text{ кгс/см}^2$$

Визначили перехідні коефіцієнти для застосування при обчисленні марки цегли

$K_1 = R_1 / R_2 = 126,68 / 81,54 = 1,537$  (коефіцієнт переходу) – для резинотканевої пластини

$K_2 = R_1 / R_2 = 126,68 / 139,72 = 0,889$  (коефіцієнт переходу) – для прокладки з технічної повсті

Результати випробувань зразків з ТзОВ «Дубечненський керамічний завод» Волинської області

1. Випробовували цеглу керамічну рядову порожнисту з розміром 250x120x65 мм, на цементно-піщаному розчині для вирівнювання зразків.

Загальне середнє значення границі міцності на стиск визначили для кожного способу за формулою:

$$R_{\text{сер}} = P1+P2+P3+P4=119,96 \text{ кгс/ см}^2$$

2. Результат випробувань зразків виготовлених на ТзОВ «Дубечненський керамічний завод» Волинської області. Випробовували керамічну рядову порожнисту цеглу розміром 250x120x65 мм, проміжна прокладка - технічна повсть.

Загальне середнє значення границі міцності на стиск визначено за формулою:

$$R_{\text{сер}} = P1+P2+P3+P4=108,63 \text{ кгс/ см}^2$$

3. Випробовували цеглу керамічну рядову порожнисту розмірами 250x120x65 мм, в якості проміжних прокладок застосовували резинотканеву пластину.

Загальне середнє значення границі міцності на стиск за формулою:

$$R_{\text{сер}} = (P1+P2+P3+P4) /4=85,79 \text{ кгс/ см}^2$$

Визначили перехідні коефіцієнти для зразків:

$K1=119,95/85,79=1,396$  (коефіцієнт переходу) - для резинотканевої пластини

$K2=R1/R2=119,94/108,65=1,1077$  (коефіцієнт переходу) – для прокладки з технічної повсті.

### Висновки

Дослідивши експериментально 3 способи руйнування цегли, визначили, що найефективнішим та найточнішим способом є дослідження зразків з резинотканевими пластинами, що застосовували як проміжні.

Перевагами цього способу є менші витрати часу на підготовку зразків та збільшення ефективності використання техніко-матеріальних ресурсів, а саме резинотканевих пластин.

Розраховуючи коефіцієнти переходу від границь міцності при стиску, за класичним способом, до границь міцності при стиску за спрощеним методом випробування з'ясовано, що на величину коефіцієнту впливає спосіб з'єднання дослідних зразків, а саме від матеріалу, який використовували в дослідженні.

При дослідженні серії зразків, випробуваних за класичною методикою (з'єднання зразків цегли цементно-піщаним розчином) встановлено, що на коефіцієнт переходу впливає вид та якість піску і водоцементне співвідношення.

Результати випробувань, доводять, що коефіцієнт переходу значно спрощує визначення марки керамічної цегли.

### References

1. Barashykov A.Ia., Malyshev O.M. Otsiniuvannia tekhnichnoho stanu budivel ta sporud: Navch.posibnyk. K.: Osnova. 2008. 320 s.

2. Bolotov M.H., Hanieiev T.R., Prybytko I.O. Doslidzhennia mekhanichnykh vlastyvostei ta strukturnoi neodnorodnosti tsehly. Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. 2015. №1(77), S. 13-19
3. Dvorkin L.I. Budivielne materialoznavstvo: navchalno-dovidkovyi posibnyk ukrainskoiu ta anhliiskoiu movamy. Rivne: NUVHP, 2017. 355 s.
4. DSTU B V.2.7-61:2008 Budivielni materialy. Tsehla ta kameni keramichni riadovi i lytsovi. Tekhnichni umovy (EN 771-1:2003, NEQ)
5. DSTU B V.2.7-248:2011 Materialy stinovi. Metody vyznachennia hranyts mitsnosti pry stysku i zghyni.
6. Klimenko V.Z., Bielov I.D. Vyprobuvannia konstruksii, obstezhennia, ta monitorynh budiviel i sporud: Pidruchnyk/Klimenko V.Z., Bielov I.D. K.: Kondor-Vydavnytstvo, 2015. 572 s.
7. Kryvenko P.V. Budivielne materialoznavstvo: pidruchnyk. Min-vo osvity i nauky, molodi ta sportu Ukrainy. 3-tie vyd., pererob. i dopov. Kyiv: Lira-K, 2014. 620 s.

### Література

1. Барашиков А.Я., Малишев О.М. Оцінювання технічного стану будівель та споруд: Навч. посібник. К.: Основа. 2008. 320 с.
2. Болотов М.Г., Ганєєв Т.Р., Прибытько І.О. Дослідження механічних властивостей та структурної неоднорідності цегли. Вісник Чернігівського державного технічного університету. 2015. №1(77), С. 13-19
3. Дворкін Л.І. Будівельне матеріалознавство: навчально-довідковий посібник українською та англійською мовами. Рівне: НУВГП, 2017. 355 с.
4. ДСТУ Б В.2.7-61:2008 Будівельні матеріали. Цегла та камені керамічні рядові і лицьові. Технічні умови (EN 771-1:2003, NEQ)
5. ДСТУ Б В.2.7-248:2011 Матеріали стінові. Методи визначення границь міцності при стиску і згині.
6. Кліменко В.З., Белов І.Д. Випробування конструкцій, обстеження, та моніторинг будівель і споруд: Підручник/Кліменко В.З., Белов І.Д. К.: Кондор-Видавництво, 2015. 572 с.
7. Кривенко П.В. Будівельне матеріалознавство: підручник. Мін-во освіти і науки, молоді та спорту України. 3-те вид., перероб. і допов. Київ: Ліра-К, 2014. 620 с.

## ДЕФОРМАТИВНІСТЬ І МІЦНІСТЬ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ ЗА ОСЬОВОГО РОЗТЯГУ

### DEFORMABILITY AND STRENGTH OF FINE GRAIN STEEL FIBRO CONCRETE UNDER AXIAL TENSION

**Р. Кінаш, д.т.н., професор (AGH Університет у Кракові, Львівський національний університет природокористування), В. Білозір, к.т.н., доцент (Львівський національний університет природокористування), І. Біденко, аспірантка (Львівський національний університет природокористування)**

**R. Kinasz, Dr. Sc., Professor (AGH University of Krakow & Lviv National Environmental University); V. Bilozir, Ph. D., Associate Professor (Lviv National Environmental University); I. Bidenko, Ph.D. Student (Lviv National Environmental University)**

*Виконано експериментальні дослідження міцності та деформативності сталефібробетону, армованого фіброю типу HE1050, за дії короткотривалого розтягу. Показано, що відносні деформації, які відповідають піковій точці діаграми деформування, залежать від вмісту фібри. Запропоновані формули для розрахунку міцності сталефібробетону на розтяг і відносних деформацій, що відповідають піковій точці діаграми деформування.*

*The purpose of these studies is to study the influence of the coefficient of fiber reinforcement with bent ends of the HE1050 type by volume  $\rho_{fv}$  and the strength of the concrete-matrix  $f_{c,prism}$  on the deformability and strength of steel-reinforced concrete under axial tension.*

*Taking into account the requirements of the standards for the design of steel fiber concrete constructions, fine-grained concrete of classes C20/25 and C30/35 was used in the experiment, since concrete classes in this range are used most often in real structures without pre-tensioning of rods. Coefficients of fiber reinforcement by volume are taken as  $\rho_{fv} = 0.007; 0.0125$  and  $0.018$ , since at lower reinforcement coefficients the strength effect is practically absent, and at higher ones, structures cease to be competitive. Ukrainian-made steel fiber with bent ends 50 mm long and 1 mm in diameter (type HE1050) was used. The strength and deformability of steel-reinforced concrete under the action of short-term tension was studied by testing samples of 400 x 120 x 30 mm, since in the future the test results will be used to evaluate the stress-strain state of beam elements of a П-shaped section with a shelf to the bottom, the cross section of which is 120 x 30 mm.*

*The following composition was adopted for the production of samples from concrete class C20/25: M400 cement of "Ivano-Frankivskcement" with an activity of 41.2 MPa - 445 kg, sand with a coarseness modulus of 2.1 from the Yasinetsky quarry - 1645*

kg, water - 240 l. To obtain concrete class C30/35, the following composition was adopted: cement grade M500 of "Ivano-Frankivskcement" with an activity of 52.3 MPa - 431 kg, sand with a coarseness modulus of 2.1 from the Yasynetsky quarry - 1724 kg, water - 216 liters. Fiber consumption per 1 m<sup>3</sup> was equal to 54.95; 98.13 and 141.3 kg for reinforcement percentages of 0.7; 1.25 and 1.8, respectively.

Based on the results of the experiments, a regression equation was obtained to determine the relative deformations corresponding to the peak point of the deformation diagram of the stretched steel-reinforced concrete reinforced with fiber with bent ends of the HE1050 type. The proposed formula for determining the tensile strength of fiber concrete reinforced with steel fiber with bent ends of type HE1050 under short-term load action.

*Ключові слова:* дрібнозернистий бетон, дисперсне армування, фіброве армування, міцність, розтяг, деформації, методи розрахунку.

*Keywords:* fine-grained concrete, dispersed reinforcement, fiber reinforcement, strength, tension, deformations, calculation methods.

**Постановка проблеми.** Для розрахунку несучої здатності елементів конструкцій, дисперсно армованих сталевую фіброю, деформаційним методом необхідно мати обґрунтовані експериментально параметри діаграм деформування сталевіфібробетону як за стиску, так і за розтягу [1].

Відомо, що міцність сталевіфібробетону на розтяг залежить від виду фібри та її зчеплення з бетоном, що в свою чергу залежить також від складу бетону. Тому детальні дослідження міцності та деформативності дрібнозернистого бетону, армованого фіброю із загнутими кінцями типу HE1050, за розтягу, особливо на висхідній вітці деформування, є актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Результати експериментально-теоретичних досліджень сталевіфібробетону як матеріалу, згинаних сталевіфібробетонних і комбіновано армованих елементів [2; 3] з урахуванням результатів досліджень [4], дозволили розробити деформаційну методику розрахунку балок, армованих стрижневою арматурою і фіброю із відходів сталевого листа [5 – 7]. У працях [8 – 10] запропоноване використання деформаційного методу для розрахунку згинаних елементів, армованих зовнішньою смуговою сталевую арматурою і фібрами зі загнутими кінцями, а також ПЕТ-фіброю.

Дослідження, виконані у ЛНТУ, також засвідчили доцільність використання вказаного методу, що дозволить ширше впроваджувати у практику будівництва комбіновано армовані фібробетонні конструкції балкового типу [11 – 13].

У праці [13] за результатами випробувань фібри на витягування з дрібнозернистого бетону запропонована уточнена формула для визначення

міцності сталевібробетону на розтяг, в якій враховано як зчеплення фібри типу HE1050 з бетоном на гладкій її частині, так і вплив кінцевих анкерів. Авторами вказано, що подальші експериментальні дослідження міцності сталевібробетону на розтяг дозволять, за необхідності, внести додаткові уточнення в запропонований розрахунковий апарат.

Таким чином, існує низка пропозицій щодо використання деформаційної методики розрахунку фібробетонних елементів, однак потребують детальнішого вивчення питання міцності і деформативності дрібнозернистого бетону, армованого фіброю, за розтягу, оскільки це впливатиме на точність розрахунку несучої здатності, наприклад, згинаних едементів і, відповідно, на надійність конструкцій

**Постановка завдання.** Завданням даних досліджень є вивчення впливу коефіцієнта армування фіброю із загнутими кінцями типу HE1050 за об'ємом  $\rho_{fv}$  і міцності бетону-матриці  $f_{c,prism}$  на деформативність і міцність сталевібробетону за осьового розтягу.

**Виклад основного матеріалу.** З урахуванням вимог вимог ДСТУ [1] вирішено в експерименті:

- прийняти дрібнозернистий бетон класів C20/25 і C30/35, так як класи бетону в цьому діапазоні використовуються найчастіше в реальних конструкціях без попереднього натягу стрижнів;

- коефіцієнти фібрового армування за об'ємом прийняти  $\rho_{fv} = 0,007; 0,0125$  і  $0,018$ , оскільки при менших коефіцієнтах армування силовий ефект практично відсутній, а при вищих – конструкції перестають бути конкурентноздатними [2; 3; 5; 7];

- використати сталеву фібру українського виробництва зі загнутими кінцями довжиною 50 мм і діаметром 1 мм (тип HE1050);

- міцнісіть і деформативність сталевібробетону за дії короткотривалого розтягу вивчити за випробувань зразків  $400 \times 120 \times 30$  мм, оскільки в подальшому результати випробувань будуть використані для оцінювання напружено-деформованого стану балкових елементів П-подібного перерізу з полицею до низу, поперечний переріз якої –  $120 \times 30$  мм.

Склади бетону розраховували згідно з вимогами ДСТУ [17] та з урахуванням рекомендацій, поданих у праці [18]. Для виготовлення зразків з класу бетону C20/25 прийнято такий склад: цемент марки М400 ПрАТ “Івано-Франківськцемент” з активністю 41,2 МПа – 445 кг, пісок із модулем крупності 2,1 Ясинецького кар'єру – 1645 кг, вода – 240 л. Для отримання класу бетону C30/35 прийнято такий склад: цемент марки М500 ПрАТ “Івано-Франківськцемент” з активністю 52,3 МПа – 431 кг, пісок із модулем крупності 2,1 Ясинецького кар'єру – 1724 кг, вода – 216 л. Витрати фібри з розрахунку на  $1 \text{ м}^3$  дорівнювали 54,95; 98,13 і 141,3 кг за відсотків армування 0,7; 1,25 і 1,8 відповідно.

Програма експериментальних досліджень дослідних зразків подана в таблиці 1.

Приготування сталевібробетонної суміші виконували у бетонозмішувачі гравітаційної дії об'ємом 250 л. Спочатку завантажували пісок, потім додавали цемент, а наприкінці – воду при працюючому бетонозмішувачі. Швидкість обертання ємності бетонозмішувача – 24 об/хв. Сталеву фібру до суміші додавали поступово. Час приготування суміші – 8 хвилин. Після вкладання суміші у форми для виготовлення розтягнутих зразків її ущільнювали поверхневим вібратором, вага якого дорівнювала 20 кг, зі швидкістю обертання 3000 об/хв протягом 35 с.

Таблиця 1  
 Програма досліджень розтягнутих зразків

Клас бетону	Марки дослідних зразків			
	Коефіцієнт фібрового армування за об'ємом			
	$\rho_{fv} = 0$	$\rho_{fv} = 0,007$	$\rho_{fv} = 0,0125$	$\rho_{fv} = 0,018$
C20/25	T-1.0.1	T-1.1.1	T-1.2.1	T-1.3.1
	T-1.0.2	T-1.1.2	T-1.2.2	T-1.3.2
	T-1.0.3	T-1.1.3	T-1.2.3	T-1.3.3
C30/35	T-2.0.1	T-2.1.1	T-2.2.1	T-2.3.1
	T-2.0.2	T-2.1.2	T-2.2.2	T-2.3.2
	T-2.0.3	T-2.1.3	T-2.2.3	T-2.3.3

Маркування зразків: Т – розтягнутий зразок; перша цифра у маркуванні: 1, 2 – міцність бетону, що відповідає класам бетону C20/25 і C30/35 відповідно; друга цифра маркування – коефіцієнт фібрового армування: 0 –  $\rho_{fv} = 0$ ; 1 –  $\rho_{fv} = 0,007$ ; 2 –  $\rho_{fv} = 0,018$ ; третя цифра – номери зразків-близнюків.

По середині висоти зразків, на відстані 200 мм від торців, виконували надрізи глибиною 10 мм, де встановлювали мессури з індикаторів із ціною поділки 0,001мм на базі 50 мм для вимірювання поздовжніх деформацій (рис. 1). У торцях зразків закладали арматуру Ø6В500 на глибину 100 мм.

Випробовували зразки на розривній машині Р-20 після 28 днів зберігання. За випробувань контролювали поздовжні деформації, ширину розкриття тріщин і навантаження. Навантажували зразки ступенями, які не перевищували 10% від руйнівних. Перед очікуваним утворенням тріщин і руйнуванням ступені навантаження зменшували до рівня 3-5% від руйнівних.

Результати випробувань розтягнутих зразків, подані в таблиці 1, свідчать, що підвищення відсотка фібрового армування за об'ємом  $\rho_{fv}$



сприяє збільшенню міцності сталевібробетону на розтяг  $f_{cft}$ , початкового модуля пружності  $E_{cft}$ , відносних деформацій бетону за утворення видимих у мікроскоп тріщин  $\epsilon_{cft,cr}$  і деформацій  $\epsilon_{cft,L}$ , що відповідають піковій точці діаграми деформування сталевібробетону за розтягу.

Були також виготовлені та випробувані на стиск бетонні призми з розмірами 100 x 100 x 400 мм з бетону класів С20/25 і С30/35. Середні значення міцності дорівнюють 23,15 МПа і 31,14 МПа відповідно.

У працях [2; 3] досліджено, що напруження, за яких утворюються тріщини у розтягнутому сталевібробетоні, несуттєво залежать від вмісту фібрової арматури, що можна виявити за використання тензорезисторів з різними базами (методика проф. Г. К. Хайдукова).



(а)



(б)

Рис.1. Розтягнутий сталевібробетонний зразок Т-1.2.1 під час випробувань (а) і бетонні та сталевібробетонні зразки Т-1.0 – Т-1.3 після випробувань (б)

Таблиця 1  
 Таблиця 1

Результати випробувань розглянутих зразків за короткочасної дії навантаження

Марка зразка	$\rho_{fv}$ , %	$f_{eff}$ , МПа	$f_{eff,m}$ , МПа	$E_{eff}$ , $10^{-9}$ , МПа	$E_{eff,m}$ , $10^{-9}$ , МПа	$\varepsilon_{eff,cr}$ , $\cdot 10^5$	$\varepsilon_{eff,cr,m}$ , $\cdot 10^5$	$\varepsilon_{eff,1}$ , $\cdot 10^5$	$\varepsilon_{eff,1,m}$ , $\cdot 10^5$
T-1.0.1		2,14		24,12		14		14	
T-1.0.2	0	2,10	2,11	24,06	24,09	13	14,67	13	14,67
T-1.0.3		2,09		24,09		17		17	
T-1.1.1		2,19		25,58		15		265	
T-1.1.2	0,7	2,24	2,23	25,49	25,56	19	17	269	265,33
T-1.1.3		2,26		25,61		17		262	
T-1.2.1		3,02		26,05		18		283	
T-1.2.2	1,25	3,06	3,01	26,11	26,07	21	19,33	289	287,67
T-1.2.3		2,95		26,05		20		291	
T-1.3.1		3,15		27,97		22		309	
T-1.3.2	1,8	3,10	3,13	27,9	27,94	24	23,33	313	309,67
T-1.3.3		3,14		27,95		24		307	
T-2.0.1		2,53		27,62		16		16	
T-2.0.2	0	2,49	2,51	27,58	27,59	11	14,33	11	14,33
T-2.0.3		2,51		27,57		16		16	
T-2.1.1		2,54		28,52		19		282	
T-2.1.2	0,7	2,52	2,54	28,54	28,54	19	19,67	289	284
T-2.1.3		2,56		28,56		20		281	
T-2.2.1		3,46		29,8		24		309	
T-2.2.2	1,25	3,42	3,43	29,75	29,78	22	23	306	308,67
T-2.2.3		3,41		29,79		23		311	
T-2.3.1		3,53		30,91		26		332	
T-2.3.2	1,8	3,51	3,51	31	30,95	23	25,67	329	332
T-2.3.3		3,49		30,94		28		335	

Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень засвідчив, що початковий модуль пружності практично лінійно залежить від вмісту фібрової арматури в одиниці об'єму бетону (рис. 2).

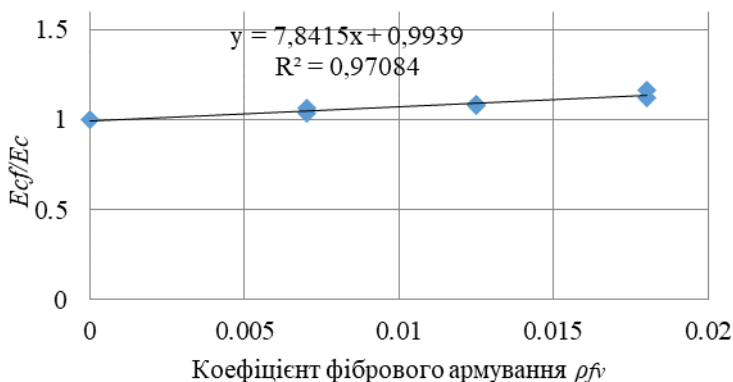


Рис. 2. Вплив вмісту фібрової арматури типу HE1050 на зміну початкового модуля пружності фібробетону за осевого розтягу

За деформаційного розрахунку згинаних сталевіробетонних елементів важливим є якомога точніше врахування параметрів пікової точки діаграми деформування сталевіробетону за розтягу. У зв'язку з цим використаємо дані таблиці 2 та математичну модель планованого повного двофакторного експерименту (ПФЕ  $2^2$ ) для оцінювання відносних деформацій сталевіробетону у цій точці. Матриця ПФЕ  $2^2$  подана в таблиці 3.

Таблиця 3

Матриця ПФЕ  $2^2$

Точка плану	Фактори		Взаємодія факторів	Вихідний параметр
	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$y$
1	+1	+1	+1	$y_1$
2	+1	-1	-1	$y_2$
3	-1	+1	-1	$y_3$
4	-1	-1	+1	$y_4$

Факторами  $X_1$  та  $X_2$  будуть призмova міцність бетону  $f_{c,prism}$  та коефіцієнт фібрового армування за об'ємом  $\rho_{fv}$ . Тому умови планування експерименту мають вид, поданий в таблиці 4.

Таблиця 4

Умови планування експерименту

Фактор		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	-1	0	+1	
$f_{cm, prism}$ МПа	$X_1$	23,15	27,145	31,14	3,995
$\rho_{fv}$	$X_2$	0,007	0,0125	0,018	0,0055

Коефіцієнти рівняння регресії ПФЕ 2<sup>2</sup> обчислені за формулою [19]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N \delta_{iu} y_u}{N}, \quad (1)$$

де  $\delta_{iu}$  – значення  $i$ -го фактора в рядку матриці експерименту в  $u$ -му досліді.

Коефіцієнт парної взаємодії факторів можна визначити за формулою [19]:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N \delta_{iu} \delta_{ju} y_u}{N}, \quad (2)$$

де  $\delta_{ju}$  – значення  $j$ -го фактора для  $u$ -го досліді.

Дисперсія відтворюваності вихідного параметра  $S_{(y)}^2$  в ПФЕ 2<sup>2</sup> розраховується за формулою [19]:

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)}, \quad (3)$$

де  $\sum_{u=1}^N$  – сума за стовпцями матриці експерименту ПФЕ 2<sup>2</sup>;

$\sum_{i=1}^r$  – те ж саме, за рядками матриці ПФЕ 2<sup>2</sup>;

$r$  – кількість дослідів у точці плану експерименту ПФЕ 2<sup>2</sup>.

Середньоквадратичне відхилення вихідного параметра обчислюється за відомою формулою [19]:

$$S_{(y)} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)}} = \sqrt{S_{(y)}^2}. \quad (4)$$

Середньоквадратичну помилку обчислюють за формулою [19]:

$$S_{\{b_0\}} = S_{\{b_i\}} = S_{\{b_{ij}\}} = \frac{S_{(y)}}{\sqrt{N}}. \quad (5)$$

Далі обчислюють значення  $t$ -критерію Стьюдента ( $t_P$ ) [19]:

$$t_{P\{b_0\}} = \frac{|b_0|}{S_{\{b_0\}}}, \quad (6)$$

$$t_{P\{b_i\}} = \frac{|b_i|}{S_{\{b_i\}}}, \quad (7)$$

$$t_{P\{b_{ij}\}} = \frac{|b_{ij}|}{S_{\{b_{ij}\}}}. \quad (8)$$

Коефіцієнти вважають значущими, коли  $t_p$ , що розраховують за формулами, які подані вище, будуть більшими за табличні значення  $t_T$  [19] і які є залежними від призначеного рівня значущості, а також від кількості ступенів свободи  $f_{(y)}$ . У дослідях, результати яких подані тут, призначили рівень значущості, який дорівнює 0,05. Тому кількість ступенів свободи знаходимо за формулою [19]:

$$f_{(y)} = N(r - 1). \quad (9)$$

У випадку, коли значення  $t_p$  виявилося би меншим за  $t_T$ , то цей коефіцієнт можна зовсім не враховувати і, відповідно, не перераховувати інших коефіцієнтів.

Дисперсія адекватності для лінійних рівнянь визначається за формулою [19]:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{r(\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_n)^2)}{N_1 - m}, \quad (10)$$

де  $m$  – кількість значущих коефіцієнтів у даному рівнянні регресії.

Адекватність моделі перевіряємо з урахуванням критерію Фішера ( $F$ -критерієм). Коли  $S_{\text{ад}}^2 > S_{(y)}^2$ , то:

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{(y)}^2}, \quad (11)$$

а коли  $S_{\text{ад}}^2 < S_{(y)}^2$ , то:

$$F_p = \frac{S_{(y)}^2}{S_{\text{ад}}^2}, \quad (12)$$

де  $S_{(y)}^2$  - дисперсія відтворюваності для вихідного параметра.

Табличне значення критерію Фішера  $F_T$  залежить від довірчої імовірності. Її найчастіше приймають такою, що дорівнює 95%. Критерій Фішера залежить також від кількості ступенів свободи дисперсії адекватності  $f_{\text{ад}}$ . Її визначають для лінійних рівнянь за формулою [19]:

$$f_{\text{ад}} = N - m. \quad (13)$$

Рівняння вважають адекватним, якщо  $F_p < F_T$ .

Матриця планування повного двофакторного експерименту (ПФЕ 2<sup>2</sup>) і експериментальні значення відносних деформацій, що відповідають піковій точці діаграми деформування фібробетону за розтягу, подані в таблиці 5.

Вільний член рівняння регресії визначали за даними таблиці 5:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} = \frac{1191 \cdot 10^{-5}}{4} = 297,75 \cdot 10^{-5}.$$

Коефіцієнти рівняння регресії  $b_1, b_2, b_{12}$  визначали за формулами (1) та (2) і даними таблиці 5:

$$b_1 = \frac{41 \cdot 10^{-5}}{4} = 10,25 \cdot 10^{-5};$$

$$b_2 = \frac{92,34 \cdot 10^{-5}}{4} = 23,085 \cdot 10^{-5};$$

$$b_{12} = \frac{3,66 \cdot 10^{-5}}{4} = 0,918 \cdot 10^{-5}.$$

Таблиця 5

Матриця планування і експериментальні значення  $\varepsilon_{cft,1}$

Марки зразків	Точка плану	Фактори		Відносні деформації, що відповідають піковій точці діаграми деформування сталевіфробетону за осьового розтягу $\varepsilon_{cft,1} \cdot 10^5$			Середнє значення $\varepsilon_{cft,1,m} \cdot 10^5$
		$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	
T-2.3	1	+1	+1	332	339	335	332
T-2.1	2	+1	-1	282	289	281	284
T-1.3	3	-1	+1	309	313	307	309,67
T-1.1	4	-1	-1	265	269	262	265,33
Сума							1191
							$b_0 = 297,75 \cdot 10^{-5}$

Для визначення значущості цих коефіцієнтів визначаємо спочатку дисперсію відтворюваності за рядками матриці (таблиця 5).

Дисперсію відтворюваності вихідного параметра  $S_{(y)}^2$  знаходили за формулою (3):

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N(r-1)} = \frac{1,39333E-08}{4(3-1)} = 1,74167E-09$$

Середньоквадратичне відхилення визначаємо за формулою (6):

$$S_{(y)} = \sqrt{S_{(y)}^2} = \sqrt{1,74167E-09} = 4,17333E-05.$$

Середньоквадратична помилка (формула (7)):

$$S_{(b_0)} = S_{(b_1)} = S_{(b_{ij})} = \frac{S_{(y)}}{\sqrt{N}} = \frac{4,17333E-05}{\sqrt{4}} = 2,08666E-05$$

Табличне значення  $t$ -критерію Стьюдента за рівня значущості  $\alpha = 0,05$  ( $P = 95\%$ ) дорівнює 2,31 [19], що відповідає кількості ступенів свободи  $f_y = N(r - 1) = 4(3 - 1) = 8$ .

З таблиці 5 вибираємо значення коефіцієнтів рівняння регресії і знаходимо розрахункове значення  $t_p$  за формулами (6) – (8):

$$t_p = \frac{|b_1|}{S_{\{b_{3,4}\}}} = \frac{10,25 \cdot 10^{-5}}{2,08666 \cdot 10^{-5}} = 4,91 > t = 2,31.$$

$$t_p = \frac{|b_2|}{S_{\{13\}}} = \frac{23,085 \cdot 10^{-5}}{2,08666 \cdot 10^{-5}} = 11,06 > t = 2,31.$$

$$t_p = \frac{|b_{12}|}{S_{\{24\}}} = \frac{0,918 \cdot 10^{-5}}{2,08666 \cdot 10^{-5}} = 0,44 < t = 2,31.$$

Отже, коефіцієнт  $b_{12}$  є незначущим, і рівняння регресії у кодованому виді набуває вигляду:

$$\hat{y} = 297,75 \cdot 10^{-5} + 10,25 \cdot 10^{-5}x_1 + 23,085 \cdot 10^{-5}x_2. \quad (16)$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначимо значення  $u$  для кожного рядка матриці і знаходимо суму квадратів відхилень розрахункових даних (таблиця 6).

Дисперсію адекватності визначаємо за формулою (10):

$$S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = \frac{r(\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_u)^2)}{N_1 - m} = \frac{3 \cdot 1,39333 \text{E} - 08}{4 - 3} = 4,17999 \text{E} - 08,$$

де  $m$  – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні.

Оскільки  $S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = 4,17999 \text{E} - 08 > S_{\{y\}}^2 = 1,74167 \text{E} - 09$ , то розрахункове значення критерію Фішера визначаємо за формулою (11):

$$F_p = \frac{S_{\{y\}}^2}{S_{\hat{a}\hat{a}}^2} = \frac{1,74167 \text{E} - 09}{4,17999 \text{E} - 08} = 4,167.$$

Таблиця 6

Коефіцієнти рівняння регресії функції  $\varepsilon_{cft,1}$

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів		
для лінійних членів		для взаємодій
$\bar{y}\bar{\delta}_1$	$\bar{y}\bar{\delta}_2$	$\bar{y}\bar{\delta}_1\bar{\delta}_2$
$+332 \cdot 10^{-5}$	$+332 \cdot 10^{-5}$	$+332 \cdot 10^{-5}$
$+284 \cdot 10^{-5}$	$-284 \cdot 10^{-5}$	$-284 \cdot 10^{-5}$
$-309,67 \cdot 10^{-5}$	$+309,67 \cdot 10^{-5}$	$-309,67 \cdot 10^{-5}$
$-265,33 \cdot 10^{-5}$	$-23,71 \cdot 10^{-5}$	$+23,71 \cdot 10^{-5}$
$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$
$+41 \cdot 10^{-5}$	$+92,34 \cdot 10^{-5}$	$+3,66 \cdot 10^{-5}$
$b_1 = +10,25 \cdot 10^{-5}$	$b_2 = +23,085 \cdot 10^{-5}$	$b_{12} = +0,915 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 7  
 Розрахунок дисперсії відтворюваності функції за рядками матриці

Точки плану $u$	$(y_1 - \bar{y}_n)^2$	$(y_2 - \bar{y}_n)^2$	$(y_3 - \bar{y}_n)^2$	$\sum S_{(y_j)}^2$
1	0	4,9E-09	9E-10	5,8E-09
2	4E-10	2,5E-09	9E-10	3,8E-09
3	4,49E-11	1,11E-09	7,13E-10	1,86667E-09
4	1,09E-11	1,35E-09	1,11E-09	2,46667E-09
Сума				1,39333E-08

Таблиця 8  
 Розрахунок дисперсії адекватності для функції  $\varepsilon_{cft,1}$

Точки плану	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$\hat{y}_u$	$\bar{y}_u$	$\hat{y}_u - \bar{y}_u$	$(\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2$
1	$297,75 \cdot 10^{-5}$	$+10,25 \cdot 10^{-5}$	$+23,085 \cdot 10^{-5}$	$331,085 \cdot 10^{-5}$	$332 \cdot 10^{-5}$	$-0,915 \cdot 10^{-5}$	$8,37225 \cdot 10^{-11}$
2	$297,75 \cdot 10^{-5}$	$+10,25 \cdot 10^{-5}$	$-23,085 \cdot 10^{-5}$	$284,915 \cdot 10^{-5}$	$284 \cdot 10^{-5}$	$0,915 \cdot 10^{-5}$	$8,37225 \cdot 10^{-11}$
3	$297,75 \cdot 10^{-5}$	$-10,25 \cdot 10^{-5}$	$+23,085 \cdot 10^{-5}$	$310,585 \cdot 10^{-5}$	$309,67 \cdot 10^{-5}$	$0,915 \cdot 10^{-5}$	$8,37225 \cdot 10^{-11}$
4	$297,75 \cdot 10^{-5}$	$-10,25 \cdot 10^{-5}$	$-23,085 \cdot 10^{-5}$	$264,415 \cdot 10^{-5}$	$265,33 \cdot 10^{-5}$	$-0,915 \cdot 10^{-5}$	$8,37225 \cdot 10^{-11}$
Сума							$3,3489 \cdot 10^{-10}$

Табличне значення критерію Фішера  $F_T$ , якщо  $f_1 = 4(3 - 1) = 8$  і  $f_2 = 4 - 3 = 1$ , дорівнює 5,32. Отже,  $F_p = 4,167 < F_T = 5,32$ , тому рівняння регресії є адекватним.

Натуральні  $X_i$  і кодовані значення  $x_i$  пов'язані залежністю [19]:

$$\tilde{\delta}_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (17)$$

де  $X_{i0}$  – значення нульової точки;

$\Delta X_{i0}$  – інтервал варіювання.

Звідси отримуємо:

$$x_1 = \frac{f_{c,prism} - 27,145}{3,995};$$

$$x_2 = \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055}.$$



Рівняння регресії для визначення  $\varepsilon_{cft,1}$  отримує вигляд:

$$\varepsilon_{cft,1} = 297,75 \cdot 10^{-5} + 10,25 \cdot 10^{-5} \frac{f_{c,prism} - 27,145}{3,995} + 23,085 \cdot 10^{-5} \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055} \quad (18)$$

Експериментальні та теоретичні значення  $\varepsilon_{cft,1}$  зразків за коефіцієнта фібрового армування по об'єму 0,0125, подані в таблиці 9, достатньо точно можна оцінити за використання рівняння регресії (18).

Таблиця 9

Експериментальні та теоретичні значення  $\varepsilon_{cft,1}$  зразків за коефіцієнта фібрового армування по об'єму 0,0125

Марки зразків	Коефіцієнт фібрового армування $\rho_{fv}$	Призмova міцність бетону-матриці $f_{cf,prism}$ , МПа	Експериментальні значення $\varepsilon_{cft,1,exp} \cdot 10^5$	Теоретичні значення $\varepsilon_{cft,1,theor} \cdot 10^5$	$\frac{\varepsilon_{cft,1,exp}}{\varepsilon_{cft,1,theor}}$
T-1.2.1	0,0125	23,15	283	288,34	0,981
T-1.2.2			289		1,002
T-1.2.3			291		1,009
T-2.2.1		31,14	309	308,84	1,001
T-2.2.2			306		0,991
T-2.2.3			311		1,007

У праці [14] запропоновано оцінювати міцність на розтяг сталевібробетону, армованого фіброю типу HE1050, з урахуванням результатів експериментів з дослідження зчеплення фібри з бетоном. Міцність сталевібробетону можна обчислювати за формулою [16]:

$$f_{cft} = k_{or} k_{cr} k_{an} \rho_{fv} f_f, \quad (19)$$

де  $k_{or}$  – коефіцієнт орієнтації фірової арматури

$k_{cr}$  – коефіцієнт ймовірності перетину фіброю площини, по якій відбувається руйнування;

$k_{an}$  – коефіцієнт анкеруючої здатності фібри;

$f_f$  – міцність фібри на розтяг.

У вітчизняному стандарті [1] прийнято, що  $k_{or} = k_{cr}$ , тому формула (19) отримає вигляд:

$$f_{cft} = k_{or}^2 k_{an} \rho_{fv} f_f. \quad (20)$$

У праці [14] показано, що коефіцієнт анкеруючої здатності  $k_{an}$  для

фібри зі загнутими кінцями не є постійним за різної довжини анкерування фібри, оскільки анкер сприймає суттєво більше зусилля, ніж гладка частина фібри, а тому його при середній довжині закладання фібри  $l_f/4$  запропоновано визначати за формулою:

$$k_{an} = \frac{1}{f_f} \left( 0,806 \frac{f_{c,prism} l_f}{4 d_f} + 327,98 \right), \quad (21)$$

де  $f_{c,prism}$  – призмova міцність бетону, МПа;

$l_f$  – довжина фібри;

$d_f$  – діаметр фібри.

Підставивши рівняння (21) у рівняння (20), отримуємо:

$$f_{cft} = k_{or}^2 \left( 0,806 \frac{f_{c,prism} l_f}{4 d_f} + 327,98 \right) \rho_{fv}. \quad (22)$$

Аналіз результатів експериментів, поданих у таблиці 1, засвідчив, що у рівняння (22) потрібно внести поправковий коефіцієнт. Тому остаточно отримано:

$$f_{cft} = k_{or}^2 \left( 0,806 \frac{f_{c,prism} l_f}{4 d_f} + 327,98 \right) \rho_{fv} (1,26 - 40,49 \rho_{fv}). \quad (23)$$

Таблиця 10

Порівняння експериментальних і теоретичних значень міцності

Марка зразка	$\rho_{fv}$ , %	$f_{cft,exp}$ МПа	$f_{cft,theor}$ МПа	$\frac{f_{cft,exp}}{f_{cft,theor}}$
T-1.1.1	0,7	2,19	2,10	1,04
T-1.1.2		2,24		1,07
T-1.1.3		2,26		1,08
T-1.2.1	1,25	3,02	2,90	1,04
T-1.2.2		3,06		1,06
T-1.2.3		2,95		1,02
T-1.3.1	1,8	3,15	2,94	1,07
T-1.3.2		3,10		1,05
T-1.3.3		3,14		1,07
T-2.1.1	0,7	2,54	2,41	1,05
T-2.1.2		2,52		1,05
T-2.1.3		2,56		1,06
T-2.2.1	1,25	3,46	3,32	1,04
T-2.2.2		3,42		1,03
T-2.2.3		3,41		1,03
T-2.3.1	1,8	3,53	3,37	1,05
T-2.3.2		3,51		1,04
T-2.3.3		3,49		1,04

Ідеалізована діаграма деформування сталевібробетону (Рис. 3) містить три ділянки. Перша з них описується поліномом п'ятого ступеня [5; 7; 12], а друга і третя – прямими.

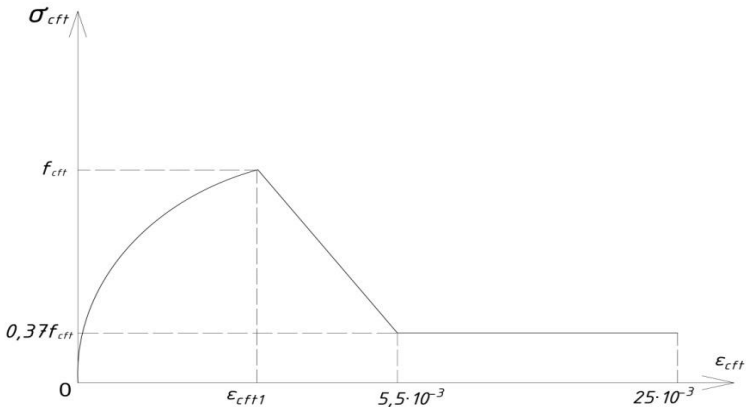


Рис. 3. Ідеалізована діаграма деформування сталевібробетону за осьового розтягу

Потрібно відмітити, що кут нахилу спадної вітки ідеалізованої діаграми деформування майже не впливатиме на несучу здатність згинаних сталевібробетонних елементів [20].

### Висновки

1. За результатами експериментів отримано рівняння регресії для визначення відносних деформацій, що відповідають піковій точці діаграми деформування розтягнутого сталевібробетону, армованого фіброю зі загнутими кінцями типу HE1050.

2. Запропонована формула для визначення міцності вібробетону, армованого сталевіброю зі загнутими кінцями типу HE1050, на розтяг за короткотривалої дії навантаження.

### References

1. DSTU-N B V.2.6-218:2016 Guidelines for the design and manufacture of structures from dispersed reinforced concrete. Kyiv: SE «UkrNDNC», 2017. 32 p. [Effective from 2017.04.01].

2. Bilozir V. V. Formation and opening of cracks in normal sections of bent steel-fiber-concrete elements on a fiber from a sheet: diss ... cand. tech. sciences. M., 1991. 164 p.

3. Bilosir W., Krapfenbauer R., Bölskey E. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegeelemente mit Fasern aus Blechabfällen. *Österreichische Ingenieur- und Architekten- Zeitschrift*. 1995. Jg.140. Nr. 2. S. 38 – 53.
4. Babych E. M., Drobysynets S. Ya. Work and calculation of bending steel fiber concrete elements. Monograph. – Lutsk: LNTU, 2012. – 194 p.
5. Bilozir V. V. Deformation method of calculation of bending steel fiber concrete elements. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Ser. Theory and practice of construction*. 2012. № 742. P. 18-24.
6. Bilozir V., Vysochenko A. Determination of the required length of fiber anchoring in concrete. *Bulletin of the Lviv National Agrarian University. Ser. Architecture and agricultural construction*. 2013. № 14. P. 64-70.
7. Kinash R., Bilozir V. Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements. *Czasopismo Techniczne (Technical Transactions: Architecture)*, 2014. I. 8- A (15). № 111. P. 49 – 58.
8. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Vysochenko A. Suspensibility of Steel Fibre Reinforced Concrete Values with External Ribbed Armature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 471 (5). 052047.
9. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bilozir V., Bidenko I. Examination of Concrete Elements Bending Strength Reinforced by Polyethylene Terephthalate (PET) Waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 603. 042041.
10. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bidenko I. Deformability of Steel-Fiber Beams with External Tape Reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 960 (2). 022046.
11. Uzhegov S. O., Uzhegova O. A., Pasichnyk R. V., Andriichuk O. V., Drobysynets S. Ya. Calculation steelfiberconcrete bending elements by the strength of normal cross section. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 2015. Vol. 3. P.
12. Andriichuk O. V., Kislyuk D. Ya., Ninichuk M. V. Determination of bearing capacity of normal sections of combined-reinforced steel fibre concrete bending elements. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 2020. Issue. 13. P. 15 – 23.
13. Andriichuk O. V., Ninichuk M. V. Theoretical determination of stress-strain state characteristics and bearing capacity of normal sections of combined-reinforced steel fibre concrete bending elements. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 2020. Issue. 14. P. 26-35.
14. Kinasz R., Bilozir V., Bidenko I. Theoretical evaluation of tensile strength of concrete reinforced with steel fiber with bent ends. *Bulletin of the Lviv National Agrarian University. Ser. Architecture and agricultural construction*. 2021. No. 22. P. 17-22.
15. RILEM TC 162-TDF. “Design of steel fibre reinforced concrete using the  $\zeta$ -w method – principles and applications (Chairlady L. Vandewalle).” *Materials and Structures*, Vol. 35, 2002, pp. 262-278.

16. Rabinovich F. N. Dispersion-reinforced concretes. Moscow: Stroyizdat, 1989. 174 p.
17. DSTU B V.2.7-215:2009. Concretes. Rules of composition selection. To replace GOST 27006-86; effective 2010-09-01. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 14 p.
18. Dworkin L. Y., Dworkin O. L. Design of concrete warehouses: monograph. Rivne: NUVHP, 2015. 353 p.
19. Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L., Zhitkovskiy V. V. Solving construction and technological problems by methods of mathematical planning of the experiment: Study. Manual. Rivne: NUVHP, 2011. 174 p.
20. Bilozir V. Influentia descendentis rami distrahentis deformationis diagramma chalybeum concretum in capacitate radiorum onere ferentium confirmatum. Nomenclator Universitatis Agrariae Nationalis Leopoliensis. Ser. Architectura et constructione agriculturae. 2015. No. 16. P. 60-64.

## Література

1. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 32 с. [Чинний з 2017.04.01].
2. Білозир В. В. Образование и раскрытие трещин в нормальных сечениях изгибаемых сталефибробетонных элементов на фибре из листа: дис... канд. техн. наук. М., 1991. 164 с.
3. Bilosir W., Krapfenbauer R., Bölskey E. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegeelemente mit Fasern aus Blechabfällen. *Österreichische Ingenieur- und Architekten- Zeitschrift*. 1995. Jg.140. Nr. 2. S. 38 – 53.
4. Бабич Є. М., Дробишинець С. Я. Робота і розрахунок згинальних сталефібробетонних елементів. Монографія. – Луцьк: ЛНТУ, 2012. – 194 с.
5. Білозир В. В. Деформаційний метод розрахунку згинальних сталефібробетонних елементів. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Сер. Теорія і практика будівництва. 2012. № 742. С. 18 – 24.
6. Білозир В., Височенко А. Визначення необхідної довжини анкерування фібри в бетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету*. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2013. № 14. С. 64 – 70.
7. Kinasz R., Bilozir V. Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements. *Czasopismo Techniczne (Technical Transactions: Architecture)*, 2014. I. 8- A (15). № 111. P. 49 – 58.
8. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Vysochenko A. Suspensibility of Steel Fibre Reinforced Concrete Values with External Ribbed Armature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 471 (5). 052047.

9. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bilozir V., Bidenko I. Examination of Concrete Elements Bending Strength Reinforced by Polyethylene Terephthalate (PET) Waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 603. 042041.
10. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bidenko I. Deformability of Steel-Fiber Beams with External Tape Reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 960 (2). 022046.
11. Ужегов С. О., Ужегова О. А., Пасічник Р. В., Андрійчук О. В., Дробишинець С. Я. Розрахунок сталевібробетонних згинальних елементів за міцністю нормальних перерізів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 2015. Вип. 3. С. 179 – 184.
12. Андрійчук О. В., Кислюк Д. Я., Нінічук М. В. Визначення несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих сталевібробетонних згинальних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 2020. Вип. 13. С. 15 – 23.
13. Андрійчук О. В., Нінічук М. В. Теоретичне визначення характеристик напружено-деформованого стану та несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих згинальних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 2020. Вип. 14. С. 26 – 35.
14. Кінаш Р., Білозір В., Біденко І. Теоретичне оцінювання міцності на розтяг бетону, армованого сталеву фібрую зі загнутими кінцями. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2021. № 22. С. 17 – 22.
15. RILEM TC 162-TDF. “Design of steel fibre reinforced concrete using the  $\zeta$ -w method – principles and applications (Chairlady L. Vandewalle).” *Materials and Structures*, Vol. 35, 2002, pp. 262-278.
16. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. Москва: Стройиздат, 1989. 174 с.
17. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Бетони. Правила підбору складу. На заміну ГОСТ 27006-86; чинні 2010-09-01. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 14 с.
18. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Проектування складів бетонів: монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 353 с.
19. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв’язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту: Навч. Посібник. Рівне: НУВГП, 2011. 174 с.
20. Білозір В. Вплив низхідної вітки діаграми деформування сталевібробетону за розтягу на несучу здатність балок. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2015. № 16. С. 60 – 64.

## EFFECT OF DEICING SALT ON AIR VOIDS AND PERMEABILITY COEFFICIENT OF ASPHALT MIXTURE UNDER DRY-WET CYCLE

### ВПЛИВ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА ЗАЛИШКОВУ ПОРИСТІСТЬ І ВОДОПРОНИКНІСТЬ АСФАЛЬТОБЕТОНУ ПРИ ПОПЕРЕМІННОМУ НАСИЧЕННІ ТА ВИСУШУВАННІ

Kovalskiy V.P., Ph.D., Associate Professor, Mingjun G., Ph.D. student  
(Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia)

Ковальський В.П., к.т.н., доцент, Мінцзюнь Г., аспірант  
(Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця)

*Although the extensive use of deicing salt has solved the problem of road icing in winter and reduced traffic accidents, it has also had a significant impact on the asphalt mixture. Through dry-wet cycle test, this study investigated the change rule of air voids and permeability coefficient of asphalt mixture under the conditions of different gradation, different deicing salt solutions and different dry-wet cycle times, and analyzed the significant indicators of each factor's impact on air voids and permeability coefficient based on variance analysis. The results showed that the air voids and permeability coefficient of AC-13 and AC-16 asphalt mixtures increased to varying degrees after 0, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 dry-wet cycles in 20% NaCl, 15%  $CH_4N_2O$ , and 20%  $CH_2CH_3OH$  solutions, and the air voids and permeability coefficient had a high correlation. Meanwhile, the variance analysis results indicated that gradation was the main factor affecting the air voids and permeability coefficient, followed by the dry-wet cycle times, and deicing salt solutions were the least significant.*

Дане дослідження присвячене вивченню впливу протиожеледних речовин на залишкову пористість і коефіцієнт водопроникності асфальтобетонних сумішей за різних умов. Незважаючи на те, що широке використання засобів протиожеледної обробки ефективно вирішує проблеми обмерзання дорожнього покриття взимку і зменшує кількість дорожньо-транспортних пригод, воно водночас має негативні вплив на експлуатаційні властивості асфальтобетонних покриттів.

Завдяки проведенню експериментів з використанням різних видів асфальтобетону, протиожеледних речовин та різної кількості циклів "сухий-мокрый", було вивчено зміни коефіцієнта пористості та коефіцієнта водопроникності асфальтобетонних сумішей. Для оцінки значущості факторів, які впливають на показники залишкової пористості та водопроникності, був використаний дисперсійний аналіз.

Результати досліджень показали, що після 0, 5, 10, 15, 20, 25 і 30 циклів "сухий-мокрый" залишкова пористість і коефіцієнт водопроникності асфальтобетонних сумішей AC-13 і AC-16 показали різний ступінь зміни показників при впливі розчинів, що містять 20% технічної солі (NaCl), 15%

карбаміду ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ) і 20% безводного етанолу ( $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ ), відповідно. Крім того, існує значна кореляція між залишковою пористістю і коефіцієнтом водопроникності.

Подальший дисперсійний аналіз показав, що гранулометричний склад є основним фактором, що впливає на коефіцієнт залишкової пористості та коефіцієнт водопроникності, далі йде кількість циклів "сухий-вологий", а вплив розчину протиожеледної рідини є найменш впливовим.

Таким чином, це дослідження всебічно розкриває вплив протиожеледних речовин на коефіцієнт залишкової пористості та коефіцієнт водопроникності асфальтобетонних сумішей за допомогою експериментів та статистичного аналізу. Результати дослідження мають важливе прикладне значення для кращого розуміння впливу протиожеледної речовини на експлуатаційні властивості дорожнього покриття, удосконалення проєктування дорожніх конструкцій та зимового утримання доріг.

*Key words: pavement performance, deicing salt, asphalt concrete, dry-wet cycle, air voids, permeability coefficient, deicing salt.*

*Ключові слова: експлуатаційні властивості дорожнього покриття, протиожеледні речовини, асфальтобетон, "сухий-мокрый" цикл, залишкова пористість, коефіцієнт водопроникності.*

**Introduction.** Asphalt mixture is widely used in road construction, and its quality has a crucial impact on road service life, driving safety, and comfort [1-2]. However, in cold weather during winter, road icing, snow accumulation, and other factors pose significant safety hazards and economic losses to road traffic [3]. Therefore, deicing salt is widely applied in road ice and snow removal, which works by melting ice and snow on the surface and preventing them from freezing again [4]. However, excessive use of deicing salt not only leads to environmental issues such as water pollution, land degradation, and climate change but also causes damage to road materials [5-6].

The size of air voids affects various properties of the asphalt mixture, such as compactness, stability, durability, and water resistance [7]. Generally, a lower air voids can improve the compactness and stability of the mixture, thereby enhancing its shear resistance and durability, and reducing water permeation and damage. ROBERT N et al. [8] found that an increase of 1% in air voids when it exceeds 7% could result in a loss of about 10% in road life. Rui Xiong [9] analyzed the relationship between pore characteristics and splitting strength, and found that the increase of open voids of asphalt mixture had a linear correlation with the decrease of splitting strength under salt corrosion environment. Di Yu [10] conducted a microstructural analysis of asphalt mixtures before and after freeze-thaw cycles, and discovered that the damage source of voids mainly transferred from large voids to small ones. The water permeability coefficient refers to the rate of water passing through the asphalt concrete and reflects its



resistance to water infiltration, which is generally highly correlated with the air voids [11]. Although there are many studies on air voids and permeability coefficient, there is relatively limited research on the variation of air voids and permeability coefficient under salt solution conditions.

Taking into account the unique climate of China's northwest region, this paper employs collected data on precipitation, air humidity, and interlayer temperature of the road surface to conduct dry-wet cycle tests on the two gradations of asphalt mixtures using three concentrations of appropriate deicing salt solutions [12-13]. Through this approach, we seek to investigate and analyze the patterns of variation in air voids and permeability coefficient, in order to deepen our understanding of the interaction between deicing salt and asphalt mixture, and to provide a certain reference for road design and maintenance.

**Experimental materials and methods.** For this experiment, KL-90 petroleum asphalt from the Karamay Refinery in Xinjiang was selected as the asphalt material. It was determined that all of its technical indicators meet the required specifications, as shown in Table 1. The coarse and fine aggregates, as well as the mineral powder, were all sourced from the Wangjiaping quarry in Lanzhou, Gansu Province. Their technical indicators also meet the required specifications, as shown in Tables 2 - 4. Urea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ) produced by Gansu Liuhua (Group) Co., Ltd., industrial salt ( $\text{NaCl}$ ) produced by Golmud Baojin Chemical Trade Co., Ltd., and anhydrous ethanol ( $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ ) produced by Tianjin Beichen Fangzheng Reagent Factory were selected as the three types of deicing salts. All of their technical indicators meet the required specifications.

Table 1  
Technical indexes of asphalt

Index	Test Result	Requirement
Penetration (25 °C, 100 g.5s)/0.1 mm	89.2	80~100
Penetration Index	-1.5	-1.5~+1.0
Extensibility (15 °C)/cm	144	≥100
Softening Point/°C	52	≥45
Flash Point/°C	287	≥245
Density (15 °C)/(g·cm-3)	1.033	—
Dynamic viscosity (60°C)/Pa·s	153	≥140
Solubility/%	99.9	≥99.5

Considering the deicing effectiveness and economic efficiency, three solutions containing 20%  $\text{NaCl}$ , 15%  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ , and 20%  $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$  were prepared for the dry-wet cycle tests on Marshall samples and rut samples with AC-13 and AC-16 gradations. The samples were subjected to 0, 5, 10, 15, 20,

25, and 30 cycles of dry-wet cycles, with each cycle consisting of immersion in the three solutions for 24 hours followed by air drying for 24 hours. After the dry-wet cycles were completed, the air voids of the mixture samples were measured using the dry-weighing method for the Marshall samples, and the permeability coefficient was determined for the rut samples using the water permeability test, in accordance with the "Standard Test Methods for Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering" (JTG E20-2011).

Table 2

Technical indicators of coarse aggregate

Index	Test Result	Requirement
Crushed Stone Value/%	17.6	$\leq 28$
Los Angeles Abrasion Loss/%	17.5	$\leq 30$
Solmdness/%	10.8	$\leq 12$
Apparent Particle Density	2.79	$\geq 2.5$
Water Absorption/%	1.7	$\leq 3$

Table 3

Technical indicators of fine aggregate

Index	Test Result	Requirement
Apparent Particle Density	2.71	$\geq 2.50$
Solmdness/%	9.2	$\leq 12$
Sand Equivalent/%	75	$\geq 60$
Mud Content/%	2.1	$\leq 3$

Table 4

Technical indicators of mineral powder

Index	Test Result	Requirement
Density/(t·m <sup>-3</sup> )	2.81	$\geq 2.5$
Water Absorption/%	0.88	$\leq 1$
Hydrophilic Coefficient/%	$\leq 1$	$\leq 1$
Appearance	No agglomerates	No agglomerates

**Results analysis and discussion.** The changes in air voids and its growth rate of the AC-13 asphalt mixture after dry-wet cycle tests in three different deicing salt solutions are shown in Figure 1.

Based on Figure 1, it can be observed that for mixture of AC-13, with an increase in the number of dry-wet cycles, the corresponding air voids for all three deicing salts increases. Among them, CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O has the greatest impact on the air voids, with an increase of 34.1% at the 30th cycle, reaching 6.05%, which no longer meets the air voids requirements for certain pavement types; NaCl has the second largest impact on air voids, with an increase of 18.8% at the 30th cycle, reaching 5.36%; the impact of CH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>OH on air voids is the

smallest, with an increase of 13.1% at the 30th cycle, reaching 5.10%.

The changes in air voids and its growth rate of the AC-16 asphalt mixture after dry-wet cycle tests in three different deicing salt solutions are shown in Figure 2.

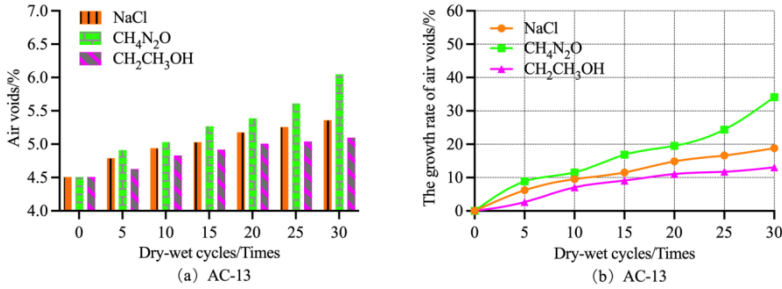


Fig. 1 Variation of air voids and its growth rate of AC-13 with the increase of dry-wet cycles

From Figure 2, it can be seen that for mixture of AC-16, with an increase in the number of dry-wet cycles, the corresponding air voids for all three deicing salts increases. Among them, CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O has the greatest impact on air voids, with an increase of 50.8% at the 30th cycle, reaching 6.38%, which no longer meets the air voids requirements for certain pavement types. NaCl has the second largest impact on air voids, with an increase of 39.2% at the 30th cycle, reaching 5.89%; the impact of CH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>OH on air voids is the smallest, with an increase of 23.8% at the 30th cycle, reaching 5.24%.

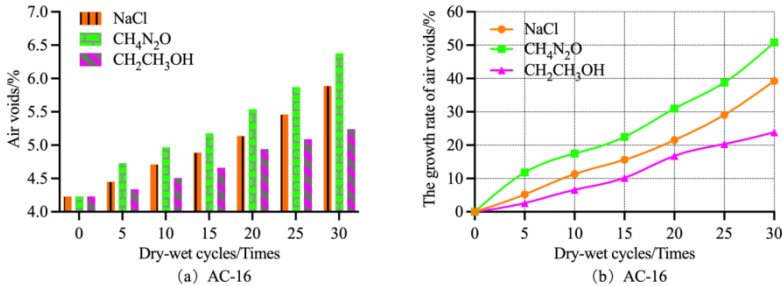


Fig. 2 Variation of air voids and its growth rate of AC-16 with the increase of dry-wet cycles

Comparing Figures 3 and 4, it can be seen that the growth rate of air voids for AC-16 is significantly higher than that for AC-13. This indicates that, in terms of air voids, the impact of the three salt solutions on AC-16 is greater than that on AC-13.

When the gradation is AC-13, the changes in permeability coefficient and its growth rate after dry-wet cycle test under three different deicing salt solutions are shown in Figure 3.

From Figure 3, it can be observed that when the gradation is AC-13, the permeability coefficients corresponding to the three types of deicing salts show an increasing trend with the increase of dry-wet cycle times. Among them,  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$  has the greatest impact on the permeability coefficient, with an increase of 32.7% and reaching 107.48 mL/min at the 30th cycle; the impact of NaCl on the permeability coefficient is secondary, with an increase of 19.6% and reaching 96.89 mL/min at the 30th cycle, while the impact of  $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$  on the permeability coefficient is the smallest, with an increase of 9.0% and reaching 88.32 mL/min at the 30th cycle.

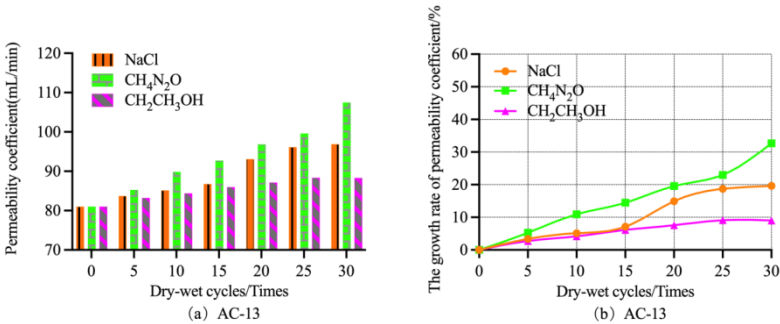


Fig. 3 Variation of permeability coefficient and its growth rate of AC-13 with the increase of dry-wet cycles

When the gradation is AC-16, the changes in permeability coefficient and its growth rate after dry-wet cycle test under three different deicing salt solutions are shown in Figure 4.

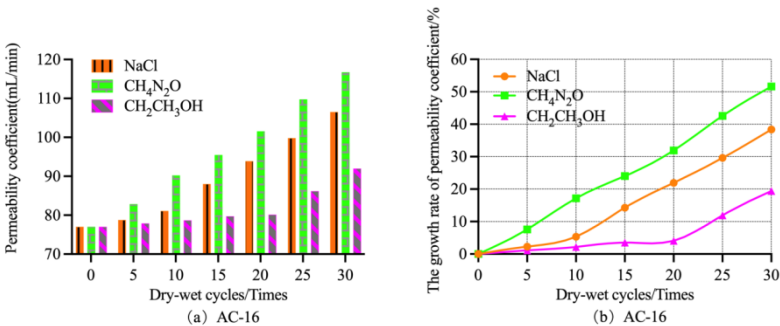


Fig. 4 Variation of permeability coefficient and its growth rate of AC-16 with the increase of dry-wet cycles

From Figure 4, it can be observed that when the gradation is AC-16, the permeability coefficients of the asphalt mixture under the three different deicing salt solutions all show an increasing trend with the increase of dry-wet cycles. Among them,  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$  has the greatest impact on the permeability coefficient, and its corresponding permeability coefficient increased by 51.6% to 116.75 mL/min after 30 cycles; NaCl has the second largest impact on the permeability coefficient, and its corresponding permeability coefficient increased by 38.4% to 106.54 mL/min after 30 cycles;  $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$  has the smallest impact on the permeability coefficient, and its corresponding permeability coefficient increased by 19.4% to 91.96 mL/min after 30 cycles.

By comparing Figure 5 and Figure 6, it can be seen that the growth rate of permeability coefficient for AC-16 is significantly higher than that for AC-13. This indicates that in terms of permeability coefficient, the impact of the three deicing salt solutions on AC-16 is greater than that on AC-13.

**Analysis of variance.** Analysis of Variance (ANOVA) was conducted to examine the variations in the effects of different factors on air voids, as shown in Table 5.

From Table 5, it can be observed that the significance difference coefficients (Sig.) between different influencing factors and the air voids of asphalt mixtures are all 0, indicating that the number of dry-wet cycles, gradation, and different deicing salt solutions have a significant impact on the air voids of asphalt mixture. From the F-value of the statistics, it can be known that the gradation has the most significant impact on the air voids, followed by the number of dry-wet cycles, and the different deicing salt solutions have the least significant impact.

Table 5

Variance analysis of different influencing factors and air voids

Source	DF	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	9	1932.035a	214.671	29.651	.000
Intercept	1	241653.090	241653.090	33378.334	.000
Number of dry-wet cycle	6	1472.055	245.342	33.888	.000
Gradation	1	272.316	272.316	37.614	.000
Solution of deicing salt	2	187.664	93.832	12.961	.000
Error	32	231.674	7.240		
Total	42	243816.799			
Corrected Total	41	2163.709			

Analysis of Variance (ANOVA) was conducted to examine the variations in the effects of different factors on permeability coefficient, as shown in Table 6.

Based on Table 6, it can be observed that the significance difference coefficients (Sig.) between different influencing factors and the permeability coefficient of asphalt mixtures are all 0, indicating that the number of wet-dry cycles, gradation, and different deicing salt solutions have a significant impact on the permeability coefficient of asphalt mixtures. From the F-value of the statistics, it can be seen that the impact of gradation on the permeability coefficient is the most significant, followed by the number of wet-dry cycles, and the different deicing salt solutions have the least significant impact.

Table 6

Variance analysis of different influencing factors and permeability coefficient

Source	DF	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	9	13729004.604a	1525444.956	51.670	.000
Intercept	1	372978439.002	372978439.002	12633.498	.000
Number of dry-wet cycle	6	10035856.346	1672642.724	56.656	.000
Gradation	1	1738836.308	1738836.308	58.898	.000
Solution of deicing salt	2	1954311.950	977155.975	33.098	.000
Error	32	944735.177	29522.974		
Total	42	387652178.782			
Corrected Total	41	14673739.781			

**Conclusions.** After conducting dry-wet cycle tests on AC-13 and AC-16 asphalt mixtures with three types of deicing salts, the following conclusions can be drawn from the analysis of the data on air voids and permeability coefficient:

(1) The impact of deicing salts on air voids and permeability coefficient of asphalt mixtures follows the order:  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O} > \text{NaCl} > \text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ .

(2) The erosion resistance of AC-13 is higher than that of AC-16, indicating that the increase of fine aggregate is beneficial to improving the service life of pavement under salt solution environment.

(3) The growth curves of air voids and permeability coefficient show high correlation, and the increase of permeability coefficient lags behind that of air voids.

(4) The results of the analysis of variance indicate that gradation is the primary factor affecting air voids and permeability coefficient, followed by dry-wet cycle times, and the effect of deicing salt solution is the least significant.

## References

1. M. Guo, M. Liang, Y. Jiao, W. Zhao, Y. Duan, and H. Liu, "A review of phase change materials in asphalt binder and asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, vol. 258, p. 119565, 2020.
2. V. P. Kovalskiy and G. Mingjun, "The influence of deicing salt on air voids of asphalt mixture under freeze-thaw cycle," *Сучасні Технології Матеріали І Конструкції В Будівництві* № 1 43–50, 2023.
3. Y. Meng et al., "Deicing characteristics and pavement performance of eco-friendly de-icing asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, vol. 360, p. 129565, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129565.
4. X. Zhang, H. Chen, and I. Hoff, "The mutual effect and reaction mechanism of bitumen and de-icing salt solution," *Construction and Building Materials*, vol. 302, p. 124213, 2021.
5. M. Guo, V. P. Kovalskiy, T. Nian, and P. Li, "Influence of Deicer on Water Stability of Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycle," *Sustainability*, vol. 15, no. 18, p. 13707, 2023.
6. W. D. Hintz, L. Fay, and R. A. Relyea, "Road salts, human safety, and the rising salinity of our fresh waters," *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 20, no. 1, pp. 22–30, 2022.
7. A. Hassn, M. Aboufoul, Y. Wu, A. Dawson, and A. Garcia, "Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 115, pp. 327–335, 2016.
8. R. N. Linden, J. P. Mahoney, and N. C. Jackson, "Effect of compaction on asphalt concrete performance," *Transportation research record*, no. 1217, 1989.
9. R. Xiong, W. Jiang, F. Yang, K. Li, B. Guan, and H. Zhao, "Investigation of voids characteristics in an asphalt mixture exposed to salt erosion based on CT images," *Materials*, vol. 12, no. 22, p. 3774, 2019.
10. D. Yu, H. Jing, and J. Liu, "Effects of Freeze–Thaw Cycles on the Internal Voids Structure of Asphalt Mixtures," *Materials*, vol. 15, no. 10, p. 3560, 2022.
11. E. S. Garcia, L. P. Thives, E. Ghisi, and L. N. Antunes, "Analysis of permeability reduction in drainage asphalt mixtures due to decrease in void volume," *Journal of Cleaner Production*, vol. 248, p. 119292, 2020.
12. Ping Li, Xiyiing Wei, Tengfei Nian, Yang liu, and Yu Mao, "Freezing Point Test of Deicers on Asphalt Pavement in Seasonal Frozen Region Bulletin of the Chinese Ceramic Society," *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, vol. 38, no. 05. pp. 1561–1567, 2019.
13. Yang liu and Ping Li, "Study on Temperature Field Prediction Model and Anti Icing Technology of Asphalt Pavement in Winter of Gansu Province," *Lanzhou University of Technology*, 2018.

УДК 711.4.025

[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10\(20\)-08](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10(20)-08)

## ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ МІСТОБУДІВНИХ ПОТРЕБ

### USE OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES FOR TOWN PLANNING NEEDS

**Мельник Ю.А., к.т.н., доцент., Верешко О.В., старший викладач (Луцький національний технічний університет), Мельник О.В., к.т.н., доцент (Волинський національний університет імені Лесі Українки), Верешко А.О., магістр (Київський національний університет будівництва та архітектури)**

**Melnyk Yu.A., Ph.D., associate professor, Vereshko O.V., senior lecturer (Lutsk National Technical University), Melnyk O.V., Ph.D., associate professor (Lesya Ukrainka Volyn National University), Vereshko A.O., magister (Kyiv National University of Construction and Architecture)**

*Проаналізовано можливості використання сучасних інформаційних технологій для потреб містобудування. На прикладі історичної частини м. Луцька показано приклад комплексного аналізу території із застосуванням ГІС-технологій.*

*The problem of providing information is one of the key ones in the field of urban planning. In the process of carrying out pre-project analysis, development, and implementation of urban planning projects, planners are faced with a huge volume of cartographic materials, statistical data, and other indicators.*

*Thanks to the wide application of information technologies, the possibility of processing spatial data appeared, which led to the development of digital cartography and geographic information systems (GIS). The growing demand for digital mapping products has contributed to the development of a new spatial data infrastructure based on geographic information mapping.*

*Modern GIS platforms have a variety of capabilities that can be applied to urban planning. Database management, visualization, spatial analysis, and spatial modeling are among the most widely used. Database management involves the storage of environmental data, socio-economic data, land use maps and plans, and planning programs. GIS in urban planning provides an opportunity for spatial analysis and modeling, which can contribute to solving several important tasks of urban planning. With the advent of mobile GIS, city planners can conduct field research, view dynamic maps on their phones, retrieve key insights, and import field data back into desktop GIS.*

*Modern GIS programs do not require long-term special training. GIS technologies are especially effective when creating, for example, a scheme of planning restrictions, when it is necessary to apply information from different fields of knowledge that affect the planning decisions of the master plan to one scheme. Project urban planning documentation becomes widely available to all city services. When making any decision*



*in your department, it is quite easy to clarify the decision of the General Plan in this area using the electronic version and thereby avoid urban planning mistakes when solving local tasks.*

*Ключові слова: сучасні інформаційні технології, ГІС-технології, міське планування, комплексна оцінка території.*

*Keywords: modern information technologies, GIS technologies, urban planning, comprehensive assessment of the territory*

### **Постановка проблеми**

Проблема забезпечення інформацією є однією з ключових у містобудівній сфері. У процесі здійснення передпроектного аналізу, розробки та впровадження містобудівних проектів проектувальники стикаються з величезним обсягом картографічних матеріалів, статистичних даних та інших показників. Завдання створення оптимальних моделей та проєктів розтягуються на кілька років, а ціна неправильних рішень є надзвичайно великою. Великі витрати часу, грошей та ресурсів обмежують кількість можливих варіантів та призводять до обмежених рішень та відсутності деталей у проєктах. Розрахункові моделі є загальними та не враховують всіх можливих наслідків рішень.

Завдяки широкому застосуванню інформаційних технологій з'явилася можливість обробки просторових даних, що призвело до розвитку цифрової картографії та географічних інформаційних систем (ГІС). Зростання попиту на цифрові картографічні продукти сприяло розвитку нової бази просторових даних на основі геоінформаційного картографування. Це позитивно впливає на вирішення проблем інформатизації у містобудуванні.

**Аналіз відомих досліджень і публікацій.** Питання використання сучасних інформаційних технологій у містобудівній практиці розглядали багато як вітчизняних так і зарубіжних вчених. Зокрема, вплив інформаційних систем на формування сучасного міського середовища детально розглянуто в роботах Семикіної О.В. [1, 2]. Питанням аналізу урбогеосистем із використанням геоінформаційних технологій присвячені роботи Кострікова С.В. [3, 4]. Проблемам формування інфраструктури геопросторових даних присвячені дослідження Карпінського Ю.А. [5]. Проблеми адаптації людини в інформаційно насиченому урбанізованому середовищі досліджує британська вчена Енн Кронін [6].

**Формулювання цілей статті, постановка завдання.** Головною метою даної роботи є розкриття суті використання сучасних інформаційних технологій в містобудівних дослідженнях. Поставлені завдання: оцінити роль сучасних інформаційних технологій в містобудівному плануванні; охарактеризувати можливості застосування ГІС-технологій для містобудівних потреб.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Міське планування - це багатогранний процес, який включає інфраструктуру, комунальні системи, комунікаційні мережі, тощо. Управління такою кількістю змінних може бути складним завданням, але сучасна ГІС-технологія пропонує рішення. Геоінформаційні системи (ГІС) стали безцінним інструментом для міських планувальників, надаючи підтримку для створення бази даних, просторового аналізу та моделювання, візуалізації.

Сучасні ГІС-платформи мають різноманітні можливості, які можна застосувати до міського планування. Управління базами даних, візуалізація, просторовий аналіз і просторове моделювання є одними з найбільш широко використовуваних.

#### *Управління базами даних*

Управління базою даних - це процес створення, імпорту, обслуговування та використання всіх даних, що переміщуються в ГІС-платформу. Для міського планування це передбачає зберігання даних про навколишнє середовище, соціально-економічних даних, карт і планів землекористування, а також програм планування. Міста створюють величезну кількість даних у багатьох різних форматах. ГІС забезпечує єдину базу даних, де всі ці дані можна зберігати та легко впорядковувати. Після додавання даних до бази даних міські планувальники можуть використовувати просторові запити для швидкого доступу до інформації.

#### *Візуалізація*

У контексті міського планування візуалізація часто відноситься до створення карт. Настільна ГІС пропонує потужні інструменти візуалізації карт, що дозволяє планувальникам створювати карти (навіть у 3D). Екологічні та соціально-економічні дані можуть бути використані для створення цих карт або додані пізніше як вторинне джерело даних.

#### *Просторовий аналіз і моделювання*

ГІС у міському плануванні дає можливість просторового аналізу та моделювання, що може сприяти вирішенню низки важливих завдань міського планування. Ці завдання включають вибір місця, аналіз придатності землі, моделювання землекористування та транспорту, визначення зон планування та оцінку впливу.

#### *Збір польових даних*

Протягом багатьох років люди асоціювали ГІС із громіздким програмним забезпеченням, встановленим локально на настільних або портативних комп'ютерах. З появою мобільної ГІС міські планувальники можуть проводити дослідження на місцях, переглядати динамічні карти на своїх телефонах, отримувати ключову інформацію та імпортувати польові дані назад у настільну ГІС.

На рис.1 показано як повинна формуватися ГІС для містобудівних потреб.

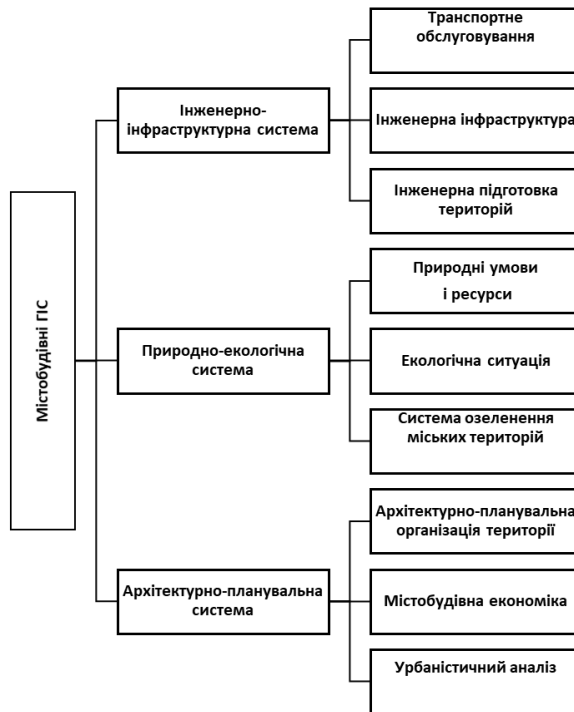


Рис. 1. ГІС- системи в містобудівному плануванні.

Кожна з цих систем містить певну кількість тем, які складаються зі значної кількості тематичних картографічних шарів з більш-менш розгалуженою семантичною базою даних. Наприклад, забудова та планувальна організація території включає наступні теми:

- опорний план (план існуючого міста);
- зони охорони та власне пам'ятки історії та культури;
- структура землекористування;
- концепція планувальної моделі міста та ін.

Сучасні ГІС-програми, включаючи продукти ESRI та CAD-системи, орієнтовані на кінцевого користувача - експерта в галузі, а не на програміста. Вони зручні, прості у використанні та не потребують багатогодинного спеціального навчання. Коли йдеться про містобудівну документацію, це означає можливість прийняття перевірених, науково обґрунтованих проектних пропозицій, заснованих на комплексному комп'ютерному аналізі поточного стану і використання міської території,

дорожньої мережі, інженерних систем і т.ін. ГІС-технології можуть, наприклад, впливати на планувальні рішення по генеральних планах. Вони особливо ефективні при створенні схем планувальних обмежень, коли інформація з різних дисциплін, що впливають на прийняття планувальних рішень, повинна бути включена в одну схему. До них відносяться обмеження на будівництво, санітарно-захисні зони підприємств, водоохоронні зони водосховищ і водотоків, санітарно-захисні зони водозаборів, зони, віддалені від об'єктів цивільного будівництва, таких як магістральні трубопроводи і лінії електропередач, а також природоохоронні території. Але найголовніше - це створення єдиного міського (регіонального) інформаційного простору. Вперше проектна містобудівна документація стає широко доступною для всіх служб міста. Приймаючи будь-яке рішення за своїм відомством, досить легко за електронною версією уточнити рішення Генерального плану на цій території і тим самим уникнути містобудівних помилок під час вирішення локальних завдань. Крім того, кожна муніципальна служба може використовувати створені нею тематичні шари ГІС для власної роботи на своїй території, а також для розширення та доповнення своєї бази даних. В ідеалі, служби повинні обмінюватися оновленими даними між собою через мережу, таким чином гарантуючи, що вони завжди матимуть актуальну інформацію не лише про свою територію, а й про суміжні території.

У містобудуванні важливою є комплексна оцінка території та збалансований план її оптимального розвитку, які включають в себе:

- інвентаризацію природних, економічних, людських ресурсів;
- комплексний містобудівний аналіз території;
- план розвитку території, що базується на соціально-економічній концепції розвитку міста та регіону.

Крім того до комплексної оцінки повинна включатись розробка заходів щодо оптимізації екологічної обстановки та покращення умов проживання населення. На підставі комплексного містобудівного аналізу, у тому числі із застосуванням усіх можливостей ГІС-технологій, має бути вироблена концепція територіального розвитку.

Приклад розробленого нами комплексного аналізу території історичної частини м. Луцька виконаного із використанням ГІС-технологій представлено на рис.2.

**Висновки.** У даній статті розглянуто актуальність застосування сучасних інформаційних технологій, зокрема геоінформаційних систем в містобудівній сфері.

Сучасні ГІС-технології надають зручні та легкі у використанні інструменти для фахівців у сфері містобудівного планування. Вони дозволяють створювати та візуалізувати карти, проводити просторовий аналіз і моделювання, що допомагає вирішувати ключові завдання для створення ефективних стратегій розвитку міст .

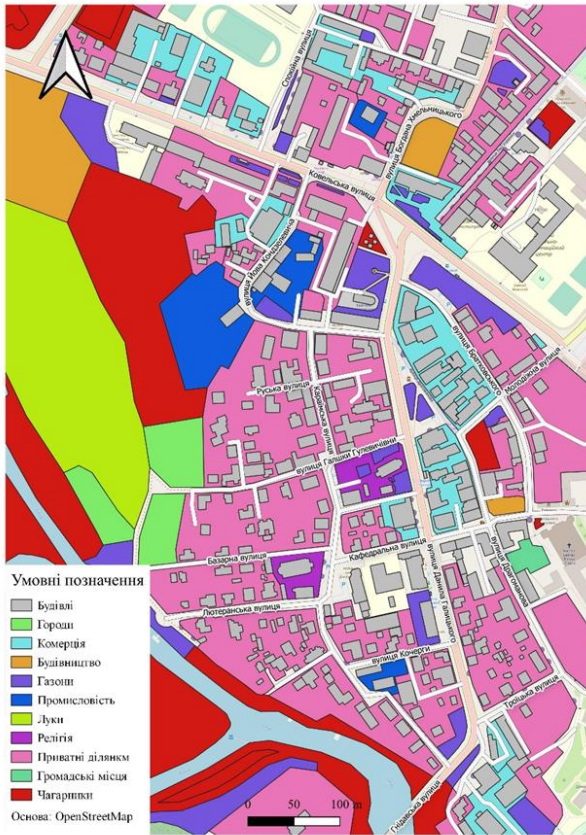


Рис 2. Комплексний аналіз території, виконаний з допомогою ГІС.

Особлива увага приділяється використанню ГІС-технологій у процесі комплексного аналізу та планування розвитку територій міст. При розробці концепції розвитку міста або його частини завдання полягає в тому, щоб визначити ключові аспекти ідентичності міста та надати інструменти для їх розкриття в нових проектах. Встановлення наочного взаємозв'язку між міською автентичністю та міською структурою є принциповою новизною концепції і має продемонструвати її наукову та прикладну цінність.

В статті наведено практичний приклад комплексного аналізу території історичної частини м. Луцька, виконаного з використанням сучасних геоінформаційних технологій. Це свідчить про ефективність застосування сучасних інструментів для вивчення, аналізу та планування міського середовища.

Отже, використання сучасних інформаційних технологій, зокрема ГІС, в містобудівних дослідженнях є актуальним і перспективним підходом, який сприяє покращенню ефективності управління міським середовищем та допомагає уникати неправильних рішень у процесі розробки містобудівних проєктів.

### **References**

1. Semykina O.V. Znachennya informatsiynykh system v formuvanni arkhitekturno-planuval'nykh rishen' suchasnykh hromads'kykh budivel'. // Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannya – K.: KNUBA, 2010. – Vyp. 25. – S. 345-350.
2. Semykina O., Kuz'mina H. Problemy formuvannya informatsiynykh system v mis'komu seredovyschi. // Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannya – K.: KNUBA, 2023. – Vyp. 65. – S. 260-270. Rezhyim dostupu: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.65.260-270>.
3. Kostrikov, S.V. Analiz dvorivnevnykh urboeosystem cherez zasoby GIS / S.V. Kostrikov, O.S. Chuyev // Visnyk KHNU.– Vyp. 44 – Heolohiya – Heohrafiya – Ekolohiya. – Kharkiv: Vydavnytstvo KHNU, 2016. – S. 98–109.
4. Kostrikov, S.V. Heoinformatsiyny pidkhid do analizu urboeosystem na pidstavi tekhnolohiyi lazernoho dystantsiynoho zonduvannya / S.V. Kostrikov // Materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «REHION-2014: Stratehiya optymal'noho rozvytku» – Kharkiv, 2014. – S. 31–34.
5. Karpins'kyu YU.A., Lyashchenko A.A. Stratehiya formuvannya natsional'noyi infrastruktury heoprosorovykh danykh v Ukraini. – K.: NDIHK, 2006.-108 s.
6. Anne M. Cronin. Advertising, Commercial Spaces, and the Urban. Published by Palgrave Macmillan, 2010. 224 p.

### **Література**

1. Семикіна О.В. Значення інформаційних систем в формуванні архітектурно-планувальних рішень сучасних громадських будівель. // Сучасні проблеми архітектури та містобудування – К.: КНУБА, 2010. – Вип. 25. – С. 345-350.
2. Семикіна О., Кузьміна Г. Проблеми формування інформаційних систем в міському середовищі. // Сучасні проблеми архітектури та містобудування – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 65. – С. 260-270. Режим доступу: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.65.260-270>
3. Костріков, С.В. Аналіз дворівневих урбогеосистем через засоби ГІС / С.В. Костріков, О.С. Чуєв // Вісник ХНУ.– Вип. 44 – Геологія – Географія – Екологія. – Харків: Видавництво ХНУ, 2016. – С. 98–109.
4. Костріков, С.В. Геоінформаційний підхід до аналізу урбогеосистем на підставі технології лазерного дистанційного зондування / С.В. Костріков // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «РЕГІОН-2014: Стратегія оптимального розвитку» – Харків, 2014. – С. 31–34.
5. Карпінський Ю.А., Лященко А.А. Стратегія формування національної інфраструктури геопросторових даних в Україні. – К.: НДІГК, 2006.-108 с.
6. Anne M. Cronin. Advertising, Commercial Spaces, and the Urban. Published by Palgrave Macmillan, 2010. 224 p.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ  
ЗБІРНО-МОНОЛІТНОГО БЕЗКАПІТЕЛЬНО-  
БЕЗБАЛКОВОГО ПЕРЕКРИТТЯ**

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ELEMENTS OF A  
JOINT-MONOLITHIC FLAT PLATE SYSTEM FLOOR**

**Микитенко С.М., к.т.н., доц. (Національний університет  
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава)**

**Mukytenko S.N., Ph. D. in Engineering, Associate Professor (National  
University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava)**

*Проведено експериментальні дослідження елементів безкапітельно-безбалкового перекриття. Дослідження проводилися шляхом випробувань натурного фрагменту багатоквартирного будинку на дію експлуатаційних навантажень. Отримані результати проведених випробувань підтвердили прийнятні розрахункові положення та конструюванні рішення вузлів та елементів збірно-монолітного перекриття безкапітельно-безбалкового каркасу.*

*The paper describes a full-scale tests of the floor fragment were performed during the construction of a three-section multi-apartment residential building. The purpose of the tests was a comprehensive check of frame members and connection joints for strength, stiffness and crack resistance requirements.*

*The structural basis of the residential building is a precast monolithic spatial frame without beams and capitals. The frame is assembled from factory products, with the subsequent monolithing of the joints. The main load-bearing members of the frame are columns with and floor slabs, the thickness of the slabs is 160 mm. The grid of columns has a step of 6 m and 3 m, the height of the floors is 3.0 m. The columns are continuous three- and two-story. Floor slabs are divided into overcolumned, intercolumned and middle. The reinforcement lugs are arranged in the form of a loop at the ends of the slabs. This design ensures a monolithic connection of adjacent slabs. Floor slabs are installed using temporary mounting supports. The reinforcement lugs on the ends of adjacent plates intersect in such a way that a closed space is formed. After installing the reinforcement, the joints of the slabs are concreted with fine-grained concrete.*

*The fragment of the overlapping above the basement of the erected house was selected for the test. The load value was calculated for individual sections of the overlap. This load was the sum of dead and live load. The loading was carried out in stages according to norms. The wall blocks made of aerated concrete were used for creating the load. These blocks were used for the construction of external and internal walls after the tests.*

*The work presents the results of the performed tests. The value of slab deflections was obtained, which did not exceed the deflections got from the calculation. The devices that were responsible for recording the vertical movements of the slabs relative to the*

columns did not record such movements. No normal cracks were found in factory-made slabs. Cracks were found in monolithic loop joints between adjacent slabs. The opening width of such cracks did not exceed the limit values. The results of the conducted tests confirmed the accepted prerequisites for the calculation and construction of the members of the precast monolithic flat plate frame. Theoretical calculations with sufficient probability reflect the adopted design model.

*Ключові слова:* безкапітельно-безбалковий каркас, натурні випробування, шпонковий стик, петльовий стик.

*Keywords:* flat plate system floor, full-scale testing, key joint concrete, loop bar joint.

В сучасному будівництві широко застосовуються житлові будинки, для яких використовується безкапітельно-безбалковий каркас. Безкапітельно-безбалковий каркас може бути монолітним або збірним. Такі будівлі можна використовувати для швидкого будівництва зруйнованого війною житлового фонду. Для підтвердження безпечності та надійності таких будинків проведено випробування перекриття в складі збірно монолітного каркасу.

Такі натурні випробування фрагменту перекриття були проведені при будівництві багатоквартирного житлового будинку в мікрорайоні «Садовий» в с. Розсошенці Полтавського району.

Випробування проводилися з метою комплексної перевірки вузлів з'єднань та елементів каркасу вимогам жорсткості, тріщиностійкості та міцності.

Конструкція такого житлового будинку являє собою збірно-монолітний просторовий каркас без капітелей та ригелів [1, 2]. Каркас будується із залізобетонних конструкцій заводського виготовлення, котрі з'єднуються між собою шляхом замоноличення стиків конструкцій між собою (рис.1). Елементи каркасу складаються з колон з поперечним перерізом 400x400 мм та плит перекриття розміром 2,95x2,95 м. Застосовуються плити перекриття товщиною 160 мм. Висота поверхів становить 3,0 м, а сітка колон має крок 6 м та 3 м. Колони нерозрізні на три або два поверхи. Плити перекриття поділяються на надколонні, міжколонні та середні. Надколонні плити мають прямокутні отвори через які монтуються на колонах. Міжколонні плити монтуються двома протилежними сторонами на надколонні плити. В простір обмежений міжколонними плитами монтують середні плити, які спираються на них чотирма сторонами.

По торцях плит перекриття зроблено випуски арматурних петель. Застосування такої конструкція стика між сусідніми плитами дозволяє облаштувати монолітний стик між суміжними панелями.



Монтаж плит перекриття виконується «насухо» із застосуванням тимчасових опор для монтажу. Арматурні випуски на торцях суміжних плит перетинаються таким чином, що утворюються замкнутий простір в який потім заводять арматурні стержні А500 діаметром 10 мм (рис.2.). Потім стики плит заповнюються дрібнозернистим бетоном класу С25/30.



Рис. 1. Вигляд збірно-монолітного безкапітельно-безбалкового каркасу

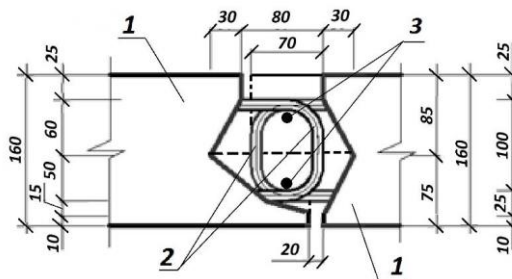


Рис. 2. Конструкція вузла з'єднання плит перекриття: 1 - плита; 2 –арматурні випуски; 3 – арматурні стержні А500 діаметром 10 мм

Вузол з'єднання надколонної плити з колоною (рис.3.) є шпонковою збірно-монолітною конструкцією. Плита з'єднується з колоною через проміжні закладні деталі, котрі зварюються з обичайкою внутрішнього отвору плити та поздовжньою арматурою колон. Простір між колоною та обичайкою плити заповнюється дрібнозернистим бетоном. Такий стик після твердіння бетону працює як шпонковий. Подібна конструкція вузла є

компактною, без виступаючих із площини перекриття частин, але в свою чергу потребує якісного виконання робіт при зварюванні та бетонуванні.

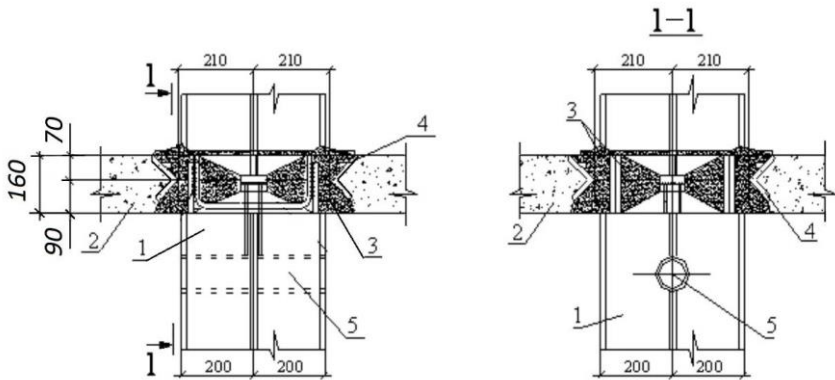


Рис 3. Конструкція шпонкового вузла з'єднання колони з надколонною плитою: 1 – колона; 2 – плита; 3 – бетонна шпонка; 4 – сталеві обичайки отвору плити; 5 – отвір для монтажу плити

Для розрахунку зусиль та переміщень в елементах каркасу використаний програмний комплекс «SCAD OFFICE 21.1». В цьому програмному комплексі реалізовано метод кінцевих елементів. Розрахунок виконаний з використанням моделей оболонок та стержнів. Задача була розв'язана на основі лінійних залежностей «деформація-напруження».

Випробування проводилися на ділянці перекриття розміром 18х9 м над підвалом зведеного будинку. Для окремих ділянок перекриття було розраховано значення контрольного навантаження (таблиця 1). Це навантаження являло собою суму постійного та корисного навантаження. Навантаження перекриття здійснювалося ступенями відповідно до ДСТУ [3]. Для цього використовувалися вантажі у вигляді стінових блоків з ніздрюватого бетону розміром 600х200х375 мм. Середня вага одного блоку становила 26,7 кгс. В програмі випробувань наведена схема розташування блоків та їх кількість для кожної ступені навантаження (рис.4). Після випробувань ці блоки були використані для зведення зовнішніх та внутрішніх стін.

Для вимірювання прогинів плит застосовувалися прогиноміри 6ПАО, в яких ціна поділки становить 0,01 мм. У вузлах з'єднання плит з колонами, для контролю можливих переміщень плит відносно колон, були встановлені індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм.

Навантаження під час випробувань прикладалося ступенями. Початкові ступені становили 10 % від величини контрольного

навантаження. Дві останні ступені становили 5% від величини контрольного навантаження.

Таблиця 1

Характеристики контрольних параметрів натурального фрагменту перекриття

Характеристики контрольних параметрів	Номер ділянки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Контрольне навантаження за міцністю нормального перерізу при $C=1,0$ , т/м <sup>2</sup>	0,33	0,36	0,25	0,19	0,94	0,41	0,58	0,43	0,50	0,50
Контрольне навантаження за жорсткістю при $C=1,0$ , т/м <sup>2</sup>	0,24	0,26	0,18	0,14	0,71	0,30	0,43	0,32	0,38	0,37
Контрольний прогин, мм	2,5	5,3	5,8	2,7	3,3	3,6	1,7	3,2	1,8	3,0
Контрольне навантаження за шириною розкриття тріщини, т/м <sup>2</sup>	0,24	0,26	0,18	0,14	0,71	0,30	0,43	0,32	0,38	0,37

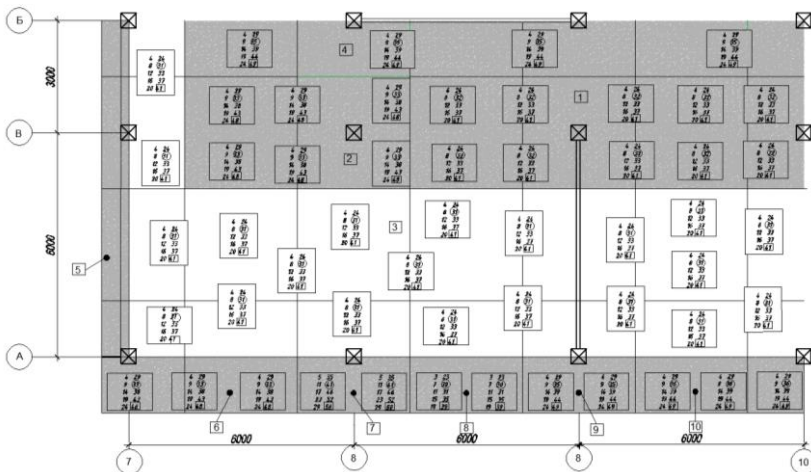


Рис.4. Схема розташування вантажів на фрагменті перекриття призначеного для випробувань

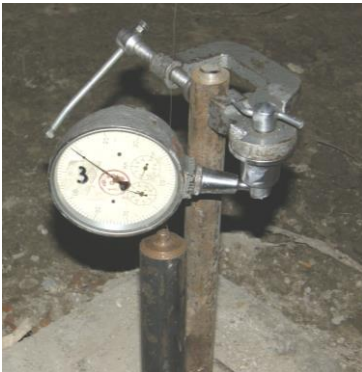
Відповідно до вимог стандарту [5], після прикладання кожної ступені навантаження ділянка перекриття витримувалася під цим навантаженням

не менше 10 хвилин. Після прикладання контрольної конструкція витримувалася під цим навантаженням не менше 30 хвилин. Вигляд навантаженого перекриття показано на рис. 5. Після прикладання повного навантаження конструкція перекриття була під навантаженням ще добу.



Рис. 5. Вигляд навантаженого перекриття

На кожній ступені навантаження фіксувалися прогини, моменти утворення тріщин та їх ширина розкриття. Прилади для реєстрації прогинів плит та переміщень шпонкових стиків колон з плитами зображено на рис.6.



а)



б)

Рис.6. а) – прилади для реєстрації прогинів плит; б) – прилади для реєстрації переміщень шпонкових стиків колон з плитами.

Максимальний прогин плит перекриття в процесі навантаження склав 3,61 мм. Максимальні вертикальні переміщення перекриття відносно колон були в межах 0,01-0,02 мм. Такі переміщені є результатом кутових деформацій плит відносно колон.

За результатами проведених випробувань зроблено такі висновки:

1. Результати отримані в процесі проведених випробувань підтвердили прийняті передумови для розрахунку та конструювання елементів збірно-монолітного перекриття безкапітельно-безбалкового каркасу.

2. Прийнята розрахункова модель та теоретичні розрахунки з достатньою вірогідністю відображають роботу .

3. В процесі випробувань не були зафіксовані вертикальні переміщення плит відносно колон. Отримані значення прогинів плит не перевищували прогини отримані з розрахунку.

4. В процесі випробувань були виявлені тріщини у монолітних петльових стиках між суміжними плитами. Ширина розкриття цих тріщин не перевищувала граничні значення. В плитах заводського виготовлення нормальних тріщин не виявлено.

## **References**

1. Pavlikov A.M. Bezkapitelno-bezbalkovi konstruktyvni systemy dlia budivel dostupnoho zhytla: konstruktyvni osoblyvosti, umovnosti rozrakhunkiv, propozytsii z udoskonalennia /A.M. Pavlikov, Ye.M. Babych, S.M. Mykytenko // Resursoekonomni materialy, konstruktzii, budivli ta sporudy: zb. nauk. prats. – Rivne: NUVHP, 2014. – Vyp.29. – S. 451-460.

2. Sergii Mykytenko. Optimization Approach to Flat Slab Reinforced Concrete Building Frame Design / Sergii Mykytenko // International Journal of Engineering & Technology, Vol.7 №(4.8) (2018) pp. 157-161.

3. Vyroby betonni ta zalizobetonni zbirni. Metody vyprovovuvan navantazhuvanniam. Pravyla otsinky mitsnosti, zhorstkosti ta trishchynostiikosti: DSTU B V.2.6-7-95. –[chynnyi vid 1996-04-01]. – K.: Ukrarkhinformbud Ukrainy, 1997. – 42 s. (Natsionalnyi standartUkrainy).

## **Література**

1. Павліков А.М. Безкапітельно-безбалкові конструктивні системи для будівель доступного житла: конструктивні особливості, умовності розрахунків, пропозиції з удосконалення /А.М. Павліков, Є.М. Бабич, С.М. Микитенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2014. – Вип.29. – С. 451-460.

2. Sergii Mykytenko. Optimization Approach to Flat Slab Reinforced Concrete Building Frame Design / Sergii Mykytenko // International Journal of Engineering & Technology, Vol.7 №(4.8) (2018) pp. 157-161.

3. Вироби бетонні та залізобетонні збірні. Методи випробувань навантажуванням. Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості: DSTU Б В.2.6-7-95. –[чинний від 1996-04-01]. – К.: Укрархінформбуд України, 1997. – 42 с. (Національний стандартУкраїни).

## ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ КОСОЗІГНУТИХ БАЛОК НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКОВОГО ОПОРУ ЗАЛІЗОБЕТОНУ

### BEARING CAPACITY DETERMINATION OF BIAXIALLY BENT BEAMS BASED ON THE DESIGN STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE

Павліков А.М., д.т.н., професор, Гарькава О.В., к.т.н., докторант,  
Атембемах К., аспірант (Національний університет «Полтавська  
політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава)

Pavlikov A.M., ScD, professor, Harkava O.V., Ph.D., associate  
professor, Atembemoh K., postgraduate student (National University “Yuri  
Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Poltava)

*На основі передумов розрахунку за Єврокодом 2 розроблено концепцію визначення значення розрахункового опору залізобетону при розрахунку міцності косозігнутих залізобетонних елементів. При цьому застосовано теорему про паралельність розташування площин дії внутрішніх та зовнішніх сил. Розглянуті випадки розрахунку для трикутної та трапецієподібної форм стиснутої зони бетону, що є характерними для косоного згинання балкових елементів. Виведені залежності для обчислення коефіцієнта впливу косоного згинання на значення характеристик елемента прямокутного перерізу з різними формами стиснутої зони бетону. Запропонований метод розрахунку міцності у нормальному перерізі балкових елементів при косому їх згинанні апробований шляхом порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними для 12 зразків косозігнутих балок.*

*Complex deformation of reinforced concrete members is widespread in the practice of operation of many building structures. It can be caused by both force and various factors of a constructive, technological, or operational nature. The application of the concept of design strength of reinforced concrete in bearing capacity calculations of reinforced concrete members under complex deformation is complicated by the presence of additional unknown parameters: the angle of the neutral axis inclination, and various forms of the compressed concrete zone in the cross-section. The essence of the design approach is that reinforced concrete is considered a composite material that has a very specific strength characteristic - the design strength of reinforced concrete. The application of this concept creates possibilities to solve the problem of the strength of reinforced concrete members based on the classical theory of strength of materials. The implemented characteristic is an integral value that takes into account the strength and deformation characteristics of concrete, reinforcement, and its amount in the section. Based on the calculation prerequisites according to Eurocode 2, the concept of determining the value of the design strength of reinforced concrete is developed for calculating the strength of reinforced concrete beams that undergo biaxial bending. The theorem on the parallelism of the location of the planes of action of internal and external*

forces is applied. The calculation cases for the most expected forms of the compressed zone of concrete in a rectangular cross-section of biaxially bent beam members are considered. The values of the coefficient of influence of biaxial bending on the characteristics of the member with triangular and trapezoidal forms of the compressed zone of concrete are obtained. The developed methodology for calculating the load-bearing capacity of biaxially bent elements based on the use of design strength of reinforced concrete is brought to the engineering level of application. The proposed method of calculating the strength in the normal cross-section of beam members under biaxial bending is approved by comparing the results of calculations with experimental data for 12 samples of biaxially bent beams.

*Ключові слова:* бетон, арматура, балка, косий згин, несуча здатність розрахунок.

*Keywords:* concrete, reinforcement, beam, biaxial bending, bearing capacity, design.

**Вступ.** Складне деформування залізобетонних елементів та конструкцій може бути викликане різними факторами силового, конструктивного, технологічного чи експлуатаційного характеру. Воно є широко розповсюдженим в практиці експлуатації багатьох будівельних конструкцій. Складного деформування зазнають чимало залізобетонних елементів, які експлуатуються в умовах косоного згинання. Такого виду складного деформування зазнають як окремі елементи (залізобетонні прогони, підкранові балки, стінові панелі та багато інших), складові частини (оболонки, мостів, сходових маршів, підземних споруд, транспортних галерей та естакад, фундаментів, фахверків), так і цілі просторові системи будівель та споруд

**Аналіз останніх досліджень.** Розрахунки міцності косо деформованих елементів на основі застосування чисельних методів розглянуто в роботах [1 – 9] для перерізів довільної форми з довільним розташуванням арматури. Для реалізації цих розрахунків на практиці були розроблені графіки у вигляді кривих момент-кривизна, кривих взаємодії граничної міцності та тривимірних поверхонь руйнування [10]. Результати досліджень міцності косозігнутих залізобетонних елементів наведені в публікаціях [11 – 12]. Розроблені алгоритми розрахунку міцності та їх результати порівняні з експериментальними даними.

Концепцію розрахункового опору залізобетону та пропозиції щодо її використання наведено в роботах [13 – 14]. Запропонований підхід полягає у тому, що залізобетон розглядається як композитний матеріал, який має визначену характеристику міцності – розрахунковий опір залізобетону. Застосування цього поняття робить можливим задачі міцності залізобетонних елементів розв'язувати на основі класичної теорії опору матеріалів. Впроваджена характеристика являє собою інтегральну

величину, яка враховує міцнісні та деформативні характеристики бетону й арматури, а також відсоток армування перерізу.

Розроблена методика розрахунку несучої здатності може бути застосована для будь-якого виду деформування залізобетонного елемента. Але використання цього методу в розрахунках міцності залізобетонних елементів при складному деформуванні ускладнюється необхідністю визначення кута нахилу нейтральної лінії та відповідної форми стиснутої зони бетону в перерізі. На сьогодні практичних пропозицій щодо застосування теорії опору залізобетону для косозігнутих елементів у такому аспекті не розроблено.

**Постановка мети і задач досліджень.** У роботі розглянуто застосування теорії розрахункового опору залізобетону при косому згинанні для елементів прямокутного перерізу з одиночним армуванням.

**Методика досліджень.** Використовуються передумови розрахунку за [15]: приймається рівномірний розподіл напружень в бетоні стиснутої зони, діаграма деформування арматури з фізичною площадкою текучості приймається дволінійною з горизонтальною ділянкою необмеженої довжини. В якості критерію руйнування застосовується деформаційний критерій.

Розв'язання задач міцності залізобетонних елементів на основі розрахункового опору залізобетону пропонується здійснювати з використанням нерівності

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = f_{zM} W \gamma, \quad (1)$$

де  $f_{zM}$  – розрахунковий опір залізобетону одиночно армованого елемента прямокутного перерізу при плоскому згинанні;  $W = bd^2/6$  – пружний момент опору прямокутного перерізу;  $\gamma$  – коефіцієнт, який враховує вплив двовісного вигину на значення характеристик елемента в (1). У роботах [13 – 14] розрахунковий опір залізобетону  $f_{zM}$  для прямокутного перерізу з одиночним армуванням з урахуванням прийнятих передумов виведений у вигляді залежності.

$$f_{zM} = 6f_{yd}\rho_l \left( 1 - \frac{f_{yd}\rho_l}{2f_{cd}} \right), \quad (2)$$

де  $\rho_l = A_s / (b_d h)$  – коефіцієнт поздовжнього армування елемента в нормальному перерізі;  $f_{yd}$  – розрахункове значення опору арматури;  $f_{cd}$  – розрахункове значення опору бетону.

Залежність (2) дає можливість протабулювати значення



розрахункового опору залізобетону залежно від класів бетону й арматури при різних відсотках армування. Для прикладу в таблиці 1 наведено значення  $f_{zM}$  для арматури класу А500С. Слід брати до уваги, що значення величин в таблиці 1 обчислені при умові, що в момент руйнування напруження в розтягнутій арматурі досягають межі текучості.

Таблиця 1

Розрахункові значення опору залізобетону для згинальних елементів прямокутного перерізу з одним армуванням арматурою класу А500С ( $f_{yd} = 435$  МПа)

$\rho_l$ , %	C16/20	C20/25	C25/30	C30/35	C32/40	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
0,05	1,29	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
0,50	11,82	12,07	12,22	12,32	12,40	12,48	12,53	12,58	12,62
1,00	21,16	22,19	22,76	23,19	23,52	23,83	24,04	24,21	24,38
1,25	24,91	26,51	27,41	28,08	28,59	29,08	29,40	29,67	29,94
1,75	30,56	33,69	35,45	36,76	37,77	38,72	39,35	39,88	40,41
2,00	–	36,54	38,84	40,56	41,88	43,12	43,94	44,63	45,32
2,50	–	–	44,38	47,06	49,12	51,06	52,35	53,42	54,50
3,00	–	–	–	52,10	55,08	57,86	59,72	61,27	62,82

Для визначення коефіцієнта  $\gamma$ , який враховує вплив косоного згинання залізобетонної балки на величину розрахункового опору залізобетону балки, розглянемо спочатку випадок, при якому стиснута зона бетону має форму трапеції. Згідно з прийнятими передумовами розрахункова схема перерізу матиме вигляд, наведений на рис. 1.

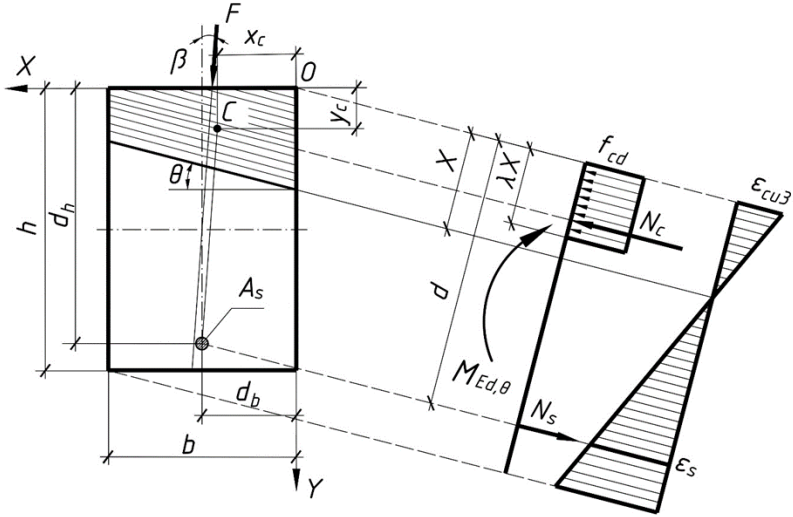


Рис. 1. Розрахункова схема перерізу косозігнутої балки з трапецієподібною формою стиснутої зони бетону

Ураховуючи викладені вище передумови розрахункові рівняння рівноваги в площині вертикальної координатної осі  $Y$  записані у вигляді.

$$\sum Z = N_s - N_c = 0; \quad (3)$$

$$\sum M_C = M_{Rd,Y} - M_{Ed,Y} = 0, \quad (4)$$

де

$$M_{Rd,Y} = N_s (d_h - y_c), \quad (5)$$

$N_s, N_c$  – рівнодійні зусиль відповідно в розтягнутій арматурі та в бетоні стиснутої зони відповідно;

$d_h$  – відстань від найбільш стиснутої фібри бетону перерізу до точки прикладання рівнодійної  $N_s$ ;

$y_c$  – координата прикладання рівнодійної  $N_c$ ;

$M_{Rd,Y}, M_{Ed,Y}$  – значення згинальних моментів від дії внутрішніх та зовнішніх зусиль відповідно в площині координатної осі  $Y$  в момент вичерпання міцності залізобетонного елемента в нормальному перерізі.

Для одержання необхідних розрахункових формул спочатку були отримані вирази рівнодійної  $N_c$ , а також відстані  $y_c$  від найбільш стиснутої фібри бетону до точки прикладання  $N_c$ . Шукані вирази для

трапецієподібної форми стиснутої зони перерізу (рис. 1) отримано в такому вигляді:

$$N_c = \frac{f_{cd} b}{\cos \theta} \left( \lambda X - \frac{b \sin \theta}{2} \right); \quad (6)$$

$$y_c = \frac{3\lambda^2 X^2 - 3\lambda X b \sin \theta + b^2 \sin^2 \theta}{3 \cos \theta (2\lambda X - b \sin \theta)}, \quad (7)$$

де  $\theta$  – кут нахилу нейтральної лінії;

$X$  – висота стиснутої зони бетону.

Оскільки задача розв'язується для випадку, коли напруження в арматурі розтягнутої зони досягають значень  $\sigma_s = f_{yd}$ , то рівнодійна зусиль в розтягнутій арматурі визначається за залежністю

$$N_s = f_{yd} A_s. \quad (8)$$

Прирівнявши праву частину нерівності (1) та рівняння (5) з урахуванням (2), (6) – (8) отримано коефіцієнт впливу косоного згинання на значення характеристик елемента в (1) для прямокутного перерізу з трапецієподібною формою стиснутої зони бетону.

$$\gamma = 1 - \frac{f_{cd}^2 \operatorname{tg}^2 \theta}{12 f_{yd} \rho_l (2 f_{cd} - f_{yd} \rho_l)} \left( \frac{b^2}{d_h^2} \right). \quad (9)$$

Отримання залежності  $\theta = f(\beta)$ , за допомогою якої можна обчислити значення кута нахилу нейтральної лінії  $\theta$  в (9), здійснено на основі застосування умови про паралельність площин дії внутрішнього  $M_{Rd,\beta}$  та зовнішнього  $M_{Ed,\beta}$  моментів, які діють у площинах, розташованих під кутом  $\beta$  до вертикальної осі симетрії перерізу. Відповідно з цією умовою в системі координат  $XOY$  (рис. 1) справедливим є співвідношення.

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{d_b - x_c}{d_h - y_c}, \quad (10)$$

у якому  $d_b$ ,  $d_h$  – робочі висоти відповідно в напрямку осей  $X$  і  $Y$  поперечного перерізу косозігнутого елемента;

$x_c$ ,  $y_c$  – координати точки прикладання рівнодійної напружень в бетоні стиснутої зони в системі координат  $XOY$ . Координата  $y_c$  визначається за залежністю (7), а координата

$$x_c = \frac{b(3\lambda X - 2b \sin \theta)}{3(2\lambda X - b \sin \theta)}. \quad (11)$$

Підстановка (7) та (11) у вихідну формулу (10) дає можливість отримати рівняння, розв'язком якого відносно  $\operatorname{tg}\theta$  буде формула, яка дозволяє обчислювати кут  $\theta$  залежно від кута  $\beta$  нахилу зовнішньої силової площини. Виділивши співвідношення  $b/d_h$  як таке, котре можна задавати, та виконавши заміну  $\rho_l = A_s / (bd_h)$ , формулу для визначення кута  $\theta$  записано так:

$$\operatorname{tg}\theta = -\operatorname{ctg}\beta \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{24f_{yd}\rho_l}{f_{cd}\operatorname{ctg}\beta} \left( \left( k - \frac{1}{2} \right) \frac{b}{d_h} - \operatorname{tg}\beta \left( 1 - \frac{f_{yd}\rho_l}{2f_{cd}} \right) \right) \left( \frac{d_h}{b} \right)^2} \right), \quad (12)$$

де  $k = d_b / b$ .

Таким чином, використовуючи залежності (9) та (12) можна протабулювати коефіцієнт впливу косоного згинання на значення характеристик елемента в (1) для прямокутного перерізу з трапецієподібною формою стиснутої зони бетону при зміні кута  $\beta$  площини дії зовнішнього навантаження відносно вертикальної осі симетрії для певного співвідношення  $b/d_h$ .

Подібним чином знайдено коефіцієнт впливу косоного згину на значення характеристик елемента (1) для прямокутного перерізу з трикутною формою стиснутої зони бетону залежно від кута  $\beta$ . При цьому була застосована схема розрахунку, наведена на рисунку 2.

Загальні рівняння рівноваги для розглядуваної розрахункової схеми на рисунку 2 матимуть вигляд (3) – (4).

Шукані вирази рівнодійної  $N_c$  в (3), а також вираз координати  $y_c$  її прикладання в (4) для трикутної форми стиснутої зони перерізу (рис. 2) набувають такого вигляду:

$$N_c = \frac{f_{cd}\lambda^2 X^2}{\sin 2\theta}, \quad (13)$$

$$y_c = \frac{\lambda X}{3\cos\theta}. \quad (14)$$

Оскільки задача розв'язується для випадку, коли напруження в арматурі розтягнутої зони досягають значень  $\sigma_s = f_{yd}$ , то рівнодійна зусиль в розтягнутій арматурі визначатиметься за залежністю (8).

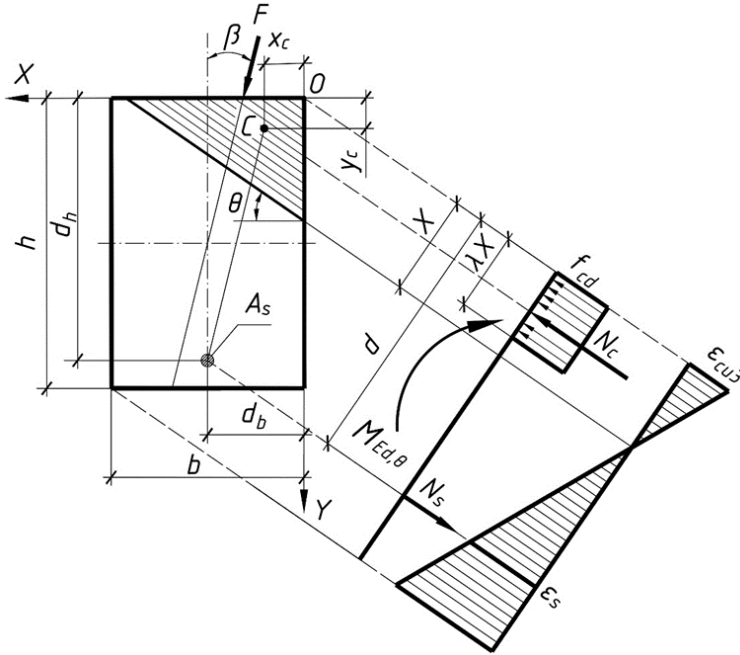


Рис. 2. Розрахункова схема перерізу косозігнутої балки з трикутною формою стиснутої зони бетону

Прирівнявши праву частину нерівності (1) і рівняння (5) з урахуванням (2), (8), (13) – (14) отримано вираз для розрахунку коефіцієнта  $\gamma$  з урахуванням впливу косої згини на значення характеристик елемента у (1) для прямокутного поперечного перерізу з трикутною формою стиснутої зони бетону, тобто.

$$\gamma = \frac{2f_{cd}}{2f_{cd} - f_{yd}\rho_l} - \sqrt{\frac{8f_{cd}f_{yd}\rho_l \operatorname{tg}\theta}{9(2f_{cd} - f_{yd}\rho_l)^2} \frac{b}{d_h}}. \quad (15)$$

Для одержання залежності  $\theta = f(\beta)$ , застосована умова (13), в якій координата  $u_c$  визначається за залежністю (14), а координата  $x_c$

$$x_c = \frac{\lambda X}{3 \sin \theta}. \quad (16)$$

Підстановка (14) та (16) у вихідну формулу (10) дає можливість отримати рівняння, розв'язком якого відносно  $\operatorname{tg}\theta$  є формула, за якою обчислюється кут  $\theta$  залежно від кута  $\beta$  нахилу зовнішньої силової площини. Виділивши співвідношення  $b/d_h$  як таке, котре можна задавати, формула для визначення кута  $\theta$  записана у вигляді:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{d_h}{b} \frac{f_{cd} l^2}{8 f_{yd} \rho_l \operatorname{tg}^2 \beta} \left( \sqrt{1 + \frac{8 f_{yd} \rho_l}{f_{cd} l^2} \frac{b}{d_h} \operatorname{tg}\beta - 1} \right)^2, \quad (17)$$

де  $l = 3kb/d_h - 3\operatorname{tg}\beta$ ;  $k = d_b/b$ .

Повноцінний розрахунок косозігнутих елементів за викладеною методикою можливий тільки при умові, що відома форма стиснутої зони бетону. Для її визначення розглядається випадок перетворення трапецієподібної форми стиснутої зони в трикутну при перетині нейтральною лінією менш стиснутого ребра перерізу. Таке положення нейтральної лінії, як це видно з порівняння розрахункових схем, зображених на рисунках 1 і 2, є граничним між цими схемами.

Із аналізу рівняння  $\Sigma Z = 0$  при граничному положенні нейтральної лінії рівняння, отримано, що умовою для розмежування форм стиснутої зони буде нерівність

$$\frac{f_{cd} X^2 \lambda^2}{\sin 2\theta} \geq f_{yd} A_s. \quad (18)$$

Якщо умова (18) виконується, стиснута зона бетону має вигляд трикутника, якщо не виконується – стиснута зона має вигляд трапеції. Для використання даної умови на практиці необхідно знати всі параметри, що входять в нерівність (18). При розв'язанні задачі перевірки міцності невідомими є два параметри  $X$  і  $\theta$ . Для визначення невідомих застосована умова про паралельність площин дії внутрішніх та зовнішніх зусиль, яка на основі розрахункової схеми записується у вигляді (10).

Після виконання математичних перетворень умова для розмежування форм стиснутої зони приводиться до простого вигляду

$$\operatorname{ctg}\beta \leq \frac{3f_{cd} - 2f_{yd}\rho_l}{f_{cd}(3k-1)} \frac{d_h}{b}. \quad (19)$$

Отже, при виконанні нерівності (19) маємо трикутну форму стиснутої зони бетону, при невиконанні – трапецієподібну.

З використанням виведених залежностей (12), (17), (23), (27) та (30) можливо визначити коефіцієнт  $\gamma$  врахування впливу косоного згинання на значення характеристик елемента в (1) для прямокутного перерізу. При цьому до уваги беруться також геометричні характеристики перерізу у вигляді співвідношень  $b / d_h$ ,  $k = d_b / d_h$  (рис. 1 – 2) та коефіцієнт  $\rho_l$  поздовжнього армування перерізу. Значення коефіцієнта  $\gamma$  для арматури класу А500С наведені в таблиці 2 для випадку досягнення розтягнутою арматурою межі текучості в момент руйнування елемента.

Таблиця 2

Коефіцієнт  $\gamma$  зниження опору залізобетону для косозігнутих елементів прямокутного перерізу з одиничним армуванням арматурою класу А500С

$$(f_{yd} = 435 \text{ МПа}, \rho_l = 1\%, b / d_h = 0,5, k = 0,5)$$

$\beta^\circ$	C16/20	C20/25	C25/30	C30/35	C32/40	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1	0,998	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
2	0,991	0,993	0,994	0,994	0,995	0,995	0,996	0,996	0,996
3	0,981	0,984	0,986	0,987	0,989	0,990	0,991	0,991	0,992
4	0,966	0,972	0,975	0,978	0,980	0,982	0,983	0,985	0,986
5	–	0,957	0,962	0,966	0,969	0,972	0,975	0,976	0,978
6	–	0,940	0,947	0,952	0,957	0,961	0,964	0,967	0,969
7	–	0,922	0,930	0,937	0,942	0,948	0,952	0,955	0,959
8	–	0,901	0,911	0,919	0,926	0,933	0,938	0,942	0,946
9	–	–	0,890	0,899	0,907	0,915	0,921	0,926	0,931
10	–	–	0,867	0,878	0,886	0,895	0,902	0,907	0,913

З використанням розробленого методу визначена міцність косозігнутих балок, досліджених в роботі [12]. Результати обчислень та експериментальні дані наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати порівняння експериментальних та теоретичних значень руйнівного згинального моменту косозігнутих балок ( $b/d_n = 0,8$ ;  $k = 0,62$ )

Шифр балки	$\sigma_{ym}$ , МПа	$A_s$ , мм <sup>2</sup>	$\rho$ , %	$f_{cm}$ , МПа	$\beta^\circ$	$f_{zM}$ , МПа	$\gamma$	$M_Y$ , кНм	$M_{\beta, theor}$ , кНм	$M_{\beta, exp}$ , кНм	$\Delta$ , %
БП-1-1	379	544	1,7	25	0,00	33,69	0,975	35,03	35,03	34,65	-1,1
БП-1-2	379	544	1,7	25	6,40	33,69	1,000	35,93	35,71	39,60	9,8
БП-1-3	379	544	1,7	25	10,00	33,69	0,991	35,61	35,07	39,15	10,4
БП-1-4	379	544	1,7	25	13,36	33,69	0,969	34,82	33,88	38,25	11,4
БП-1-5	379	544	1,7	22	20,00	33,01	0,892	31,40	29,50	30,15	2,1
БП-3-1	542	292	0,91	22	0,00	26,32	0,979	27,48	27,48	27,90	1,5
БП-3-2	542	292	0,91	22	13,36	26,32	0,971	27,27	26,54	30,15	12,0
БП-3-3	542	292	0,91	22	20,00	26,32	0,905	25,40	23,87	27,45	13,1
БП-4-1	581	462	1,44	21	0,00	40,28	0,958	41,15	41,15	41,40	0,6
БП-4-2	581	462	1,44	21	6,40	40,28	1,000	42,96	42,69	42,30	-0,9
БП-4-3	581	462	1,44	21	10,00	40,28	0,991	42,56	41,91	44,10	5,0
БП-4-4	581	462	1,44	21	13,36	40,28	0,964	41,40	40,28	43,65	7,7

**Висновки.** Розроблено концепцію визначення величини розрахункової міцності залізобетону для розрахунку несучої здатності косозігнутих залізобетонних балок. Розраховано значення коефіцієнта впливу косоного згинання на характеристики елемента прямокутного перерізу з трикутною та трапецієподібною формами стиснутої зони бетону. Запропонована методика визначення міцності в нормальному перерізі косозігнутих балок на основі розрахункового опору залізобетону забезпечує задовільну збіжність даних розрахунку з даними, отриманими за результатами експериментів.

#### References

1. Lau C.Y., Chan S.L. and So A.K.W. "Biaxial Bending Design of Arbitrarily Shaped Reinforced Concrete Column", *ACI Structural Journal*, 90(3) pp. 269–78, 1993.
2. Kim J.-K. and Lee S.-S. "The behavior of reinforced concrete columns subjected to axial force and biaxial bending", *Engineering Structures*, 22(11), pp. 1518–28, 2000.
3. Fafitis A. "Interaction Surfaces of Reinforced-Concrete Sections in Biaxial Bending", *Journal of Structural Engineering*, 127(7), 2001.



4. Sfakianakis M.G. “Biaxial bending with an axial force of reinforced, composite and repaired concrete sections of arbitrary shape by fiber model and computer graphics”, *Advances in Engineering Software*, 33(4), pp. 227–42, 2002.
5. Furlong R.W., Hsu Ch-T. T. and Mirza S. A. “Analysis and Design of Concrete Columns for Biaxial Bending-Overview”, *ACI Structural Journal*, 101(3), pp. 413–22, 2004.
6. Bonet J.L., Romero M.L., Miguela P.F. and Fernandez M.A. “A fast stress integration algorithm for reinforced concrete sections with axial loads and biaxial bending”, *Computers & Structures*, 82(2–3), pp. 213–25, 2003.
7. Bonet J.L., Barros M.H.F.M., and Romero M.L. “Comparative study of analytical and numerical algorithms for designing reinforced concrete sections under biaxial bending”, *Computers & Structures*, 84(31-32), pp. 2184–2193, 2006.
8. Pallarés L., Bonet J. L., Miguel P. F. and Fernández Prada M. A. “Experimental research on high strength concrete slender columns subjected to bending and biaxial bending forces”, *Engineering Structures*, 30(7), pp. 1879-94, 2008.
9. Di Ludovico M., Lignola, G. P., Prota A. and Cosenza E. “Nonlinear Analysis of Cross Sections under Axial Load and Biaxial Bending”, *ACI Structural Journal*, 107(4), pp. 390–9, 2010.
10. Papanikolaou V. K. “Analysis of arbitrary composite sections in biaxial bending and axial load”, *Computers & Structures*, 98-99, pp. 33-54, 2012.
11. Rodrigues R. “A new technique for ultimate limit state design of arbitrary shape RC sections under biaxial bending”, *Engineering Structures*, 104(1), pp. 1–17, 2015.
12. Pavlikov A., Kosior-Kazberuk M., and Harkava O. “Experimental testing results of reinforced concrete beams under biaxial bending”, *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3.2), pp. 299–305, 2018.
13. Kochkarov D.V. “Nonlinear resistance of reinforced concrete elements and structures to force effects”, *Rivne: O. Zen*, 2015, p 384.
14. Pavlikov A., Kochkarov D., and Harkava O. “Calculation of reinforced concrete members strength by the new concept”, *Innovations in Materials, Design, and Structures: Proc. of the fib Symp. 2019 (Kraków)*, pp. 820–7, 2019.
15. EN 1992-1-1:2004 9 (2006) Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (Lausanne: Fédération Internationale du Béton (fib))

### **Література**

1. Lau C.Y., Chan S.L. and So A.K.W. “Biaxial Bending Design of Arbitrarily Shaped Reinforced Concrete Column”, *ACI Structural Journal*, 90(3) pp. 269–78, 1993.
2. Kim J.-K. and Lee S.-S. “The behavior of reinforced concrete columns subjected to axial force and biaxial bending”, *Engineering Structures*, 22(11), pp. 1518–28, 2000.
3. Fafitis A. “Interaction Surfaces of Reinforced-Concrete Sections in Biaxial Bending”, *Journal of Structural Engineering*, 127(7), 2001.

4. Sfakianakis M.G. “Biaxial bending with an axial force of reinforced, composite and repaired concrete sections of arbitrary shape by fiber model and computer graphics”, *Advances in Engineering Software*, 33(4), pp. 227–42, 2002.
5. Furlong R.W., Hsu Ch-T. T. and Mirza S. A. “Analysis and Design of Concrete Columns for Biaxial Bending-Overview”, *ACI Structural Journal*, 101(3), pp. 413–22, 2004.
6. Bonet J.L., Romero M.L., Miguela P.F. and Fernandez M.A. “A fast stress integration algorithm for reinforced concrete sections with axial loads and biaxial bending”, *Computers & Structures*, 82(2–3), pp. 213–25, 2003.
7. Bonet J.L., Barros M.H.F.M., and Romero M.L. “Comparative study of analytical and numerical algorithms for designing reinforced concrete sections under biaxial bending”, *Computers & Structures*, 84(31-32), pp. 2184–2193, 2006.
8. Pallarés L., Bonet J. L., Miguel P. F. and Fernández Prada M. A. “Experimental research on high strength concrete slender columns subjected to bending and biaxial bending forces”, *Engineering Structures*, 30(7), pp. 1879-94, 2008.
9. Di Ludovico M., Lignola, G. P., Prota A. and Cosenza E. “Nonlinear Analysis of Cross Sections under Axial Load and Biaxial Bending”, *ACI Structural Journal*, 107(4), pp. 390–9, 2010.
10. Papanikolaou V. K. “Analysis of arbitrary composite sections in biaxial bending and axial load”, *Computers & Structures*, 98-99, pp. 33-54, 2012.
11. Rodrigues R. “A new technique for ultimate limit state design of arbitrary shape RC sections under biaxial bending”, *Engineering Structures*, 104(1), pp. 1–17, 2015.
12. Pavlikov A., Kosior-Kazberuk M., and Harkava O. “Experimental testing results of reinforced concrete beams under biaxial bending”, *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3.2), pp. 299–305, 2018.
13. Кочкаръов Д.В. “Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам”, Рівне: О. Зень, 2015, р 384.
14. Pavlikov A., Kochkarov D., and Harkava O. “Calculation of reinforced concrete members strength by the new concept”, *Innovations in Materials, Design, and Structures: Proc. of the fib Symp. 2019 (Kraków)*, pp. 820–7, 2019.
15. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд. К.: Мінрегіонбуд України, 2012. 312 с.

## МІСТОБУДІВНИЙ АНАЛІЗ ІСТОРИКО-АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ МІСТА БЕРЕСТЕЧКО

### URBAN PLANNING ANALYSIS OF THE HISTORICAL AND ARCHITECTURAL HERITAGE OF THE CITY OF BERESTECHKO

**Парфентьєва І.О., к.т.н., доцент, Степанюк В.О., студентка, Ротко С.В., к.т.н., (Луцький національний технічний університет)**

**Parfentieva I.O., Ph.D. in Engineering, associate professor, Stepaniuk V.O., student, Rotko S.V., Ph.D. in Engineering, associate professor (Lutsk National Technical University)**

*Охорона історико-архітектурної спадщини українських міст повинна бути пріоритетним завданням сучасного містобудування. Недостатнє фінансування і недбалість місцевої влади призводять до руйнування і знищення цінних будівель та споруд. До списку таких міст входить Берестечко Волинської області. В статті проведено містобудівний аналіз Берестечка і аналіз архітектурних споруд, що мають історичну цінність, визначено найбільш перспективні напрямки розвитку міста і запропоновано шляхи подолання наявних проблем в планувальній структурі міста.*

*Protection of the historical and architectural heritage of Ukrainian cities should be a priority task of modern urban planning. Insufficient funding and negligence of local authorities lead to the destruction and destruction of valuable buildings and structures that bear the memory of the Ukrainian people. The list of cities in which such a situation arose includes Berestechko, and Volyn region. In the article, an urban planning analysis of Berestechko and an analysis of architectural structures of historical value were carried out, the most promising directions of the city's development were determined, and ways to overcome existing problems in the planning structure of the city were proposed.*

*Berestechko is a city of historical significance due to its location within its borders of valuable architectural and urban planning monuments. During the rule of this territory of the Republic of Poland, the city played an important role in the transport and trade system. During the reign of the Soviet government, considerable damage was caused to the architecture of the city: valuable buildings were used as warehouses, no reconstruction was carried out, etc. In the 90s of the last century, the planned repairs and reconstruction of historical buildings were postponed and suspended due to the financial crisis. At that time, a significant number of the population emigrated from the city. All these events had a negative impact on the city and slowed down its development.*

*Now our task is to restore the destruction and encourage the development of the city of Berestechko. This article is aimed at revealing the city's potential, defining its*

*strengths and weaknesses. The analysis of the historical-architectural heritage will allow to assess the value and profitability of their restoration and maintenance in a normal state. Here prospects and opportunities that are not currently available due to neglect and underfunding.*

*Ключові слова: історико-архітектурна спадщина, Берестечко, містобудівний аналіз.*

*Keywords: the historical and architectural heritage, Berestechko, planning analysis.*

**Аналіз останніх досліджень.** На сьогодні в Україні існує перелік історичних населених пунктів, який затверджений Постановою Кабміну. До його складу увійшло і м. Берестечко разом із 402-ма населеними пунктами, тобто вона має статус «історичного» [1]. Воно має довгу історію, яка сягає бронзового віку. На його території міститься чимала кількість цінних історико-архітектурних і містобудівних пам'яток. Відповідно до Закону України «Про охорону культурної спадщини» [2], в Берестечку, як у місті, що занесене до списку історичних, суворо регламентуються будь-які архітектурно-містобудівні перетворення, виділяються відповідні заповідні території, створюються охоронні зони і зони регулювання забудови.

**Постановка задачі.** Незважаючи на високу історичну цінність міста Берестечко, у 1990-і рр. основні здобутки попереднього століття були знищені економічною кризою. Сьогодні місто знаходиться в занедбаному стані: зазнали шкоди всі сфери його діяльності. Завданням сьогодення повинно стати відновлення втраченої спадщини, реставрація тих будівель і споруд, які ще залишилися і запобігти таким руйнуванням в майбутньому.

Для правильної організації такої території необхідно провести містобудівний аналіз. Його результати допоможуть чітко визначити можливості міста, його сильні і слабкі сторони. На основі отриманих даних стане можливо розробити ефективну планувальну структуру міста, відповідно до пріоритетних напрямків розвитку, враховуючи його історико-архітектурну цінність.

Метою даної статті є провести містобудівний SWOT-аналіз м.Берестечко – визначити сильні і слабкі сторони досліджуваного населеного пункту, можливості і загрози його зростання; дослідити вплив історико-архітектурної і містобудівної спадщини, на планувальну структуру і на формування головних шляхів розвитку міста.

**Виклад основного матеріалу.** Місто Берестечко розташоване на території Волинської області у Луцькому районі, є центром Берестечківської міської громади. Його площа складає 19,8 км<sup>2</sup>. Воно збудоване на березі річки Стир, за 47 км на південь від обласного центру. Місто межує з Рівненською й Львівською областями,

Сьогодні у Берестечку мешкає близько 1700 осіб – це одне із найменш заселених міст в Україні. Транспортна структура міста базується на двох основних територіальних автодорогах Т-03-02 і Т-18-06, що там перетинаються.

Берестечко розташоване в широтах, для яких притаманний вологий континентальний клімат, тобто тепле літо, прохолодна зима, незначні перепади температур в межах доби і року, достатня кількість опадів [3].

Незважаючи на стрімкий розвиток вторинного сектора економіки в місті, значна частина населення зайнята у виробництві продукції сільського господарства.

Місто має довгу історію, що тягнеться ще з часів бронзової доби – найстаріші знахідки датуються саме цим періодом. Давня історія Берестечка тісно пов'язана із історією древнього Перемиля – величного міста-фортеці, центру удільного князівства 1241 року. Берестечко виникло на передмісті Перемиля і згодом стало самостійним поселенням. Вперше Берестечко згадується понад 550 років тому та датується 1-м червнем 1445 року як село Берестки Перемильської волості. 7 липня 1547 року великий Литовський князь дозволив князеві Семену Пронському у його селі Берестечку закласти місто. Ставши містом, Берестечко значно піднеслося у своєму розвитку [4].

Значного розвитку інфраструктура Берестечка зазнала у 50-60-х роках минулого століття. В цей період було започатковано зоологічний технікум, який потім реорганізували в ПТУ №27, також було відкрито школу та районну лікарню. Активно будувались заводи, серед них заводи з виготовлення будівельних матеріалів, павільйон побутового обслуговування, філіали Горохівського плодоконсервного і сирзаводів, поблизу міста видобували торф. У 1963 році відкрився міський краєзнавчий музей.

Нині у місті Берестечко функціонують ряд громадських і промислових будівель, які забезпечують населення необхідними матеріалами, продуктами, послугами і місцями працевлаштування. Серед них: міська рада, будинок культури, бібліотеки для дорослих та дітей, лікарня і аптека, ветлікарня та ветаптека, лісництво, автозаправна і автобусна станції, овоче переробний завод, пункт охорони громадського порядку та пожежна частина; дільниця управління газового господарства, філія Ощадбанку та відділення «Приват», а також магазини різного призначення та малі промислові підприємства і т.п. Діє середня загальноосвітня школа I-III ст., дитсадок «Малютко», музична школа, будинок дитячої та юнацької творчості. Заклад середньої спеціальної освіти ПТУ №27 забезпечує навчання трактористів-машиністів сільськогосподарського виробництва, мулярів, штукатурів, кухарів, кондитерів, а також водіїв автотранспортних засобів категорій «В» і «С»[4].

В Берестечку збереглися численні архітектурні пам'ятки. Передусім йдеться про святині пов'язані з римо-католицькими релігійними течіями: каплиця Святої Теклі та собор Святої Трійці. Даний собор вважають однією з найкращих культових споруд, побудованих в стилі рококо на Україні. Найстарішою будівлею у місті є Мурований стовп, який знаходиться на місці колишньої могили О.Пронського.

Крім того на території Берестечка розміщується ряд, так званих, зелених зон, що також мають цінність і охороняються. Серед них Берестечківський парк – пам'ятка садово-паркового мистецтва площею 4,5га, утворений за рішенням облради від 1994 року. Був взятий під охорону у зв'язку з тим, що в його межах росте близько 60 порід дерев і чагарників.

Якщо проаналізувати місто за його планом (рис.1), то можна зауважити, що Берестечко має витягнуту форму з південного сходу на північний захід. Йому притаманна вільна схема планування. Через місто протікає річка Стир, яка розділяє його на дві частини. Більша частина території лежить на лівому березі, там знаходиться і загальноміський центр.



Рис. 1. План м.Берестечко

Центр міста в плані має компактну форму, суміщається з історичним (рис. 2). На даній території поєднані будівлі різного призначення, включаючи важливі історико-архітектурні пам'ятки і сквери. Слід зауважити, що структура загальноміського центру є хаотичною, погано поєднує в собі історичну, громадську і житлову забудову. Всі споруди виконані в різних стилях. Крім того, більшість із них потребують ремонту.



Рис. 2. План загальноміського центру Берестечка

Зупинимось детальніше на кожній історико-архітектурній пам'ятці окремо. Розглянемо Троїцький костел, Свято-Троїцький собор, каплицю Святої Теклі, Мурований стовп - найвизначніші будівлі і споруди міста.

Будівництво Троїцького костелу (рис. 3) стартувало 24 липня 1711 року за кошти, виділені польським діячем Томашем Карчевським. Його зведенням поляки прагнули увічнити перемогу в битві під Берестечком. Храм повинен був стати підтвердженням могутності Речі Посполитої і показати всю велич їхньої віри.



Рис. 3. Сучасний вигляд Троїцького костелу зовні та всередині

Будівельні роботи в храмі було завершено в 1765 році. Троїцький костел має величний вигляд і побудований в стилі рококо. Всередині стіни собору прикрашали картини з епізодами битви під Берестечком. У храмі було вісім віктарів, оздоблення внутрішнього простору доповнювали дерев'яні скульптури та унікальні ікони. Костел мав підвал, у який

виходили декілька підземних ходів, однак в наш час вони непридатні до використання. Під час Другої світової війни костел постраждав від вибуху снаряда. В костелі був знищений орган, вивезені дерев'яні скульптури. В післявоєнний період його приміщення використовували під склад для зберігання зерна, а з 1952 році в будівлі монастиря працював сирзавод. Сьогодні костел потребує реставраційних робіт.

Свято-Троїцький собор (рис. 4) почали зводити ще в 1910 році. Згідно з проектом архітекторів Свято-Троїцький собор повинен складатися з трьох частин – Підземного, Основного та Верхнього храмів. Однак у зв'язку з виникненням певних труднощів пов'язаних із зміною влади, спорудження храму за планом стало неможливим. Було зведено лише перші два храми. Внаслідок цих подій, храм набув непропорційного призмекуватого вигляду.

Після Другої світової війни Свято-Троїцький собор слугував складом. Лише у 90-х роках минулого століття було прийнято рішення завершити будівництво храму. Було зроблено ремонт, внутрішній розпис виконав місцевий художник Микола Кліцук. У 2000 році розпочали реконструкцію собору, внаслідок якої має з'явитися Верхній храм. Згідно проекту головний купол повинен сягати до 50 м висоти, було збудовано два західних куполи. Сьогодні відновлювані роботи продовжуються. Будівельні роботи здійснюються за рахунок української православної громади.



а



б

Рис. 4. Сучасний вигляд Свято-Троїцького собору ззовні (а); вигляд всередині (в процесі реконструкції) (б)

Каплиця Святої Теклі (рис. 5) збудована у XVII ст. в техніці базилики. Вона розташована в західній частині міста на кургані ( відомому також як Дівич-гора), висота якого сягає 3,5м. За основу її конструкції взято чотири колони з шатровим дахом і стрілочастими арками. Нині споруда потребує



реставрації. Дата останніх проведених робіт не відома, проте нею прийнято вважати початок 2000-х років.

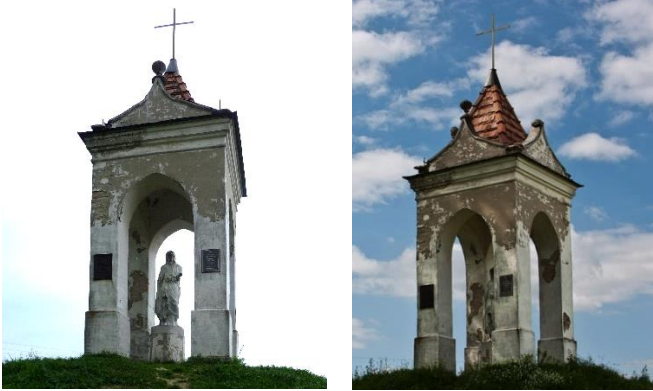


Рис. 5. Сучасний вигляд каплиці Святої Теклі

Мурований стовп (рис. 6) вважається найстарішою спорудою в Берестечку. Історія його створення має багато суперечливих теорій і таємниць. Це оригінальний пам'ятник, що має вигляд піраміди з каменю, споруджено на могилі князя Олександра Пронського – сина засновника Берестечка. В середині 16-ти метрової споруди стояла труна з тілом князя, якого згодом поховали. На каменях, з яких виконаний стовп, містить багато написів, датованих XIX століттям, серед яких є навіть автограф польського короля Станіслава Августа Понятовського, який був тут у 1787 році.



Рис. 6. Мурований стовп

На основі наведеного вище матеріалу було проведено містобудівний SWOT-аналіз (табл.1), в результаті якого визначено сильні і слабкі сторони досліджуваної місцевості, її можливості та ризики.

Таблиця 1

## Містобудівний SWOT-аналіз міста Берестечко

S	W
СИЛЬНІ СТОРОНИ	СЛАБКІ СТОРОНИ
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Наявність великої кількості історичної спадщини</li> <li>✓ Сприятливий клімат</li> <li>✓ Значні природні ресурси для розвитку рекреаційної сфери</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Незначна кількість населення</li> <li>✓ Мала кількість робочих місць</li> <li>✓ Значна віддаленість від великих населених пунктів</li> <li>✓ Нерозвинена транспортна інфраструктура</li> <li>✓ Слабка інженерна інфраструктура</li> <li>✓ Відсутність впорядкованого планування міських територій</li> <li>✓ Зanedбаність цінних історико-архітектурних пам'яток</li> <li>✓ Хаотичність розміщення забудови</li> </ul>
O	T
МОЖЛИВОСТІ	РИЗИКИ
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Розвиток пізнавального туризму</li> <li>✓ Залучення коштів інвесторів для реставрації будівель і споруд, що мають історичне значення</li> <li>✓ Створення рекреаційних зон</li> <li>✓ Розвиток існуючих підприємств, що працюють на місцевій сировині</li> <li>✓ Розвиток дорожньо-транспортної мережі</li> <li>✓ Залучення трудових ресурсів із прилеглих сіл і селищ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Знищення історичної спадщини через недбалість</li> <li>✓ Інтенсивна міграція населення до великих міст</li> <li>✓ Забруднення територій через неправильну організацію сміттєвідведення</li> </ul>

**Висновок.** Проведений містобудівний SWOT-аналіз і аналіз історико-архітектурної спадщини показав можливості і перспективи розвитку міста Берестечко. Було встановлено доцільність використання статусу історичного міста і пам'яток архітектури, що там знаходяться, для залучення туристичних потоків. Такий бізнес має великі перспективи на досліджуваній території і може стати головним джерелом доходу. Проте для його розвитку необхідно провести ряд заходів з усунення слабких сторін міста. Для здійснення правильної політики щодо вдосконалення Берестечка як міста необхідно провести його містобудівне планування на основі результатів аналізу і створити план його розвитку.

### **References**

1. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine N 878 On approval of the list of historical settlements of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/878-2001-%D0%BF#Text>
2. The Law of Ukraine On the Protection of Cultural Heritage. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14#Text>
3. Berestechko URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Берестечко>
4. Website of Berestechkiv city council URL: <https://berestechkivskagromada.gov.ua/>

### **Література**

1. Постанова Кабінету Міністрів України N 878 Про затвердження списку історичних населених місць України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/878-2001-%D0%BF#Text>
2. Закон України Про охорону культурної спадщини. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14#Text>
3. Берестечко. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Берестечко>
4. Берестечківська громада. Історичне Берестечко. URL: <https://berestechkivskagromada.gov.ua/istorichna-dovidka-12-08-38-29-01-2018/>
5. Сайт Берестечківської міської ради. URL: <https://berestechkivskagromada.gov.ua/>

**УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ПОСЛІДОВНОСТІ ЗВЕДЕННЯ НА  
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОНСТРУКЦІЙ ПРИ  
АВТОМАТИЗОВАНОМУ ПРОЄКТУВАННІ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД**

**TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE  
ERECTION SEQUENCE ON THE STRESS-STRAIN STATE OF  
STRUCTURES IN THE AUTOMATED DESIGN OF BUILDINGS AND  
STRUCTURES**

**Ротко С.В., к.т.н., доц., Ужегова О.А., к.т.н., доц., Талах Л.О.,  
к.т.н., доц., Булда К.О., Артемук Т.С., магістри (Луцький  
національний технічний університет, Луцьк)**

**Rotko S., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Uzhehova O.,  
Ph.D. in Engineering, Talakh L.O., Ph.D. in Engineering, Bulda K.,  
Artemuk T., masters (Lutsk National Technical University, Lutsk)**

*У роботі представлено результати дослідження напружено-деформованого стану конструктивних елементів багатоповерхової монолітної будівлі без урахування та з урахуванням послідовності зведення*

*Until now, the practice of conducting static calculations with the simultaneous loading of elements of the calculation scheme prevails in the case of automated design of buildings, that is, calculation justifications of constructive decisions are made according to the one-step calculation procedure. At the same time, the stiffness characteristics are assumed to be constant, and the magnitudes and nature of the loads assigned to the calculation model are unchanged during the entire calculation.*

*However,, the building construction process consists of many stages and depends significantly on the sequence of work performed on the construction site. For monolithic buildings, the fact that concrete gains its design strength over a certain period is important. That is, during numerical modeling, it is necessary to take into account the change in stiffness and strength characteristics of materials.*

*And monolithic structures are made using formwork with the installation of temporary supports, which will be installed and removed in a certain order. Thus, at different stages of construction, the structural and calculation scheme of the building may change. Ultimately, these parameters will affect the stress-strain state of structures.*

*Automated design of a monolithic multi-story frame building in two modes - traditional and taking into account the sequence of construction - revealed some differences in the results of the stress-strain state of the structural elements of the design scheme.*

*In general, the comparison of the results showed that the difference in both calculation options is insignificant on the lower floors, but increases on the upper floors, with an increase in the height of the building.*

*We can make a general conclusion that the calculation taking into account the sequence of erection is important for high-rise buildings, it must be performed for buildings of a high class of responsibility. It will allow you to get a real picture of the operation of all structural elements, give the correct assessment of the VAT of the latter, and correctly design them. As a result, it can affect the cost of construction by reducing the cost of reinforcement and concrete. This approach will minimize the risks of both local destruction and emergency situations during the life cycle of structural elements of buildings and structures.*

*Ключові слова: монолітна будівля, розрахункова схема, скінченно-елементна модель, послідовність зведення, напружено-деформований стан.*

*Keywords: monolithic building, calculation scheme, finite element model, construction sequence, stress-strain state.*

**Постановка проблеми.** Розмаїття і складність сучасних об'єктів будівництва вимагають розробки досконалих числових моделей, здатних охопити всі нюанси, пов'язані з розрахунком і проектуванням конструкцій. Робиться наголос на важливості врахування при проектуванні будівлі чи споруди потенційних змін у напружено-деформованому стані (НДС) відповідальних конструктивних елементів протягом усіх етапів будівництва, завантаження та подальшої експлуатації. Чинні нормативні документи та традиційна будівельна практика часто не враховують усіх факторів, які можуть призвести до руйнування. Таким чином, актуальною є задача впровадження сучасних технологій проектування, здатних враховувати зміни напружено-деформованого стану конструкцій протягом усього життєвого циклу будівлі, від проектування, будівництва, експлуатації – і аж до знесення.

**Мета роботи** – виконати порівняння напружено-деформованих станів конструктивних елементів монолітної багатоповерхової житлової будівлі при двох видах автоматизованого розрахунку – традиційному та з урахуванням процесу зведення.

**Вступ.** На даний час більшість розрахунків конструкцій проводиться без урахування послідовності зведення будівель і споруд. Це можна пояснити відсутністю у чинних нормативних документах [1,2] чітких вимог щодо таких розрахунків, але це потенційно може призвести до суттєвих похибок у результатах.

Переважає практика автоматизованого проектування будівель передбачає статичні розрахунки з одночасним завантаженням елементів розрахункової схеми. Це означає, що конструктивні рішення приймають через одноетапну процедуру розрахунку. Під час цього процесу характеристики жорсткості вважаються постійними, а величини та

характер навантажень, призначених на розрахункову модель, залишаються незмінними протягом усього розрахунку.

Автоматизоване проектування монолітних каркасних будівель необхідно виконувати з урахуванням процесу їх зведення. На сьогодні це актуальне завдання, особливо – при проектуванні багатопверхових монолітних будівель.

**Огляд літератури за темою роботи.** Процес зведення будівлі є складним і тривалим у часі, складається з низки етапів, суттєво залежить від послідовності робіт, що виконуються на будівельному майданчику. У випадку монолітного будівництва вирішальним фактором є час, за який бетон досягає проектної міцності. Тому цей аспект необхідно враховувати під час чисельного моделювання, контролюючи «зміну характеристик жорсткості в процесі навантаження (повзучість, тріщини). В процесі монтажу при будівництві перехід до нової монтажною стадії часто здійснюється, коли зведена на попередніх стадіях конструкція ще не набрала проектною 28-добовою міцності. Це також зумовлює необхідність врахування нелінійних ефектів, так як від стадії до стадії змінюється жорсткість зведених елементів, відповідно до часу їх зведення» [3].

Варто враховувати і той факт, що монолітні конструкції зводяться за допомогою опалубки, яка передбачає установку та подальший демонтаж тимчасових опор у певній послідовності. Отже, на різних етапах будівництва конструктивна і розрахункова схеми будівлі можуть зазнавати змін. Зрештою, ці модифікації вплинуть на напружено-деформований стан конструкцій [4].

У світли вищезазначених міркувань професор М. Барабаш у своїй роботі [5] надає обґрунтування важливості врахування процесу зведення будівлі чи споруди уже на стадії проектування будівельного об'єкта. Це важливо для врахування варіацій у параметрах НДС конструкцій на кожній стадії їх життєвого циклу під час розрахунку моделі.

У своєму дослідженні [6] автори прослідковують закономірності впливу історії навантажень на НДС елементів конструкцій під час зведення будівлі.

**Виклад основного матеріалу.** В сучасних умовах визначення напружено-деформаційного стану будівельних конструкцій здійснюється із використанням такого програмного забезпечення, яке може враховувати послідовність процесу зведення будівлі, вносячи зміни в розрахункову схему на кожному етапі будівництва. Таку можливість надають користувачам вітчизняні програмні комплекси ЛПРА-САПР, МОНОМАХ-САПР, SCAD, що містять спеціалізовані розрахункові модулі «Монтаж» [7, 8, 9]. Ці модулі мають деяку особливість, що дозволяє моделювати важливі сценарії, такі як установка або видалення тимчасових опор під час встановлення монолітних конструкцій, застосування або зняття монтажних навантажень, зниження міцності та жорсткості бетону, якщо бетонна

суміш не досягла своєї проектної міцності, здійснювати контроль за поетапним перетворенням моделі [3].

Ці модулі також дозволяють моделювати процес демонтажу елементів, навантажень або перекриттів (під час реконструкції або знесення будівлі).

Отже, розрахунок ведеться на кожному етапі будівництва на основі відповідної конструктивної схеми будівлі, що включає в себе вже змонтовані або демонтовані на даний момент елементи. Одночасно можна враховувати поточну міцність бетону та його модуль пружності. У випадках, коли проектна кількість арматури або прийнятий переріз залізобетонного елемента виявляються недостатніми, проектні рішення коригуються.

Проектований у роботі багатопверховий каркасно-монолітний житловий будинок (рис. 1) має односекційну конструкцію з розмірами в плані 27x21 м. При загальній висоті 32 м будівля включає паркінговий рівень висотою 4,0 м, перший і вісім типових поверхів, висотою 3,0 м кожен. Просторова жорсткість конструкції забезпечується спільною роботою монолітних залізобетонних колон, центрального монолітного ядра жорсткості та дисків перекриттів і покриття, які зберігають незмінність конструкції у горизонтальному напрямку.

Каркас прийнято з кроком колон 6 і 3 м перерізом 400x400 мм і 500x500 мм. Несучі монолітні залізобетонні конструкції проектуються із таких класів бетону: С16/20 – фундаментна плита товщиною 800 мм, С16/20 – колони та діафрагми жорсткості, С20/25 – плити перекриттів і покриття, товщиною 200 мм.

Розрахункова схема будівлі (рис. 2) була створена за допомогою програми КОМПОНОВКА у програмному комплексі «МОНОМАХ-САПР», згодом трансформована у скінченно-елементну модель.

Програмний комплекс «МОНОМАХ-САПР» дає можливість враховувати поступове, поетапне зведення будівлі, з вирівнюванням рівнів перекриттів. Для визначення програмою відповідних етапів, необхідно в діалоговому вікні «МСЕ розрахунок» (рис. 3) вказати номери поверхів, що входять до складу кожного етапу будівництва.

При цьому власна вага послідовно присвоюється елементам під час їх монтажу, а для інших навантажень, закладених у постійне, розробники рекомендують вказувати момент їх прикладання. Експлуатаційні навантаження діятимуть після завершення будівництва всієї будівлі, тому й задавати їх потрібно на етапі повністю сформованої розрахункової схеми. Розрахунок виконується на кожному етапі монтажу (тієї конструктивної системи будівлі, що включає в себе елементи і навантаження, які відповідають цьому етапу).

За допомогою МСЕ-розрахунку програма обчислює зусилля і напруження, які накопичуються в елементах розрахункової схеми у

процесі зведення будівлі. При цьому модуль «Монтаж» зводить до нуля переміщення вузлів, доданих перед розрахунком кожного наступного етапу.



Рис. 1. Проектована житлова будівля

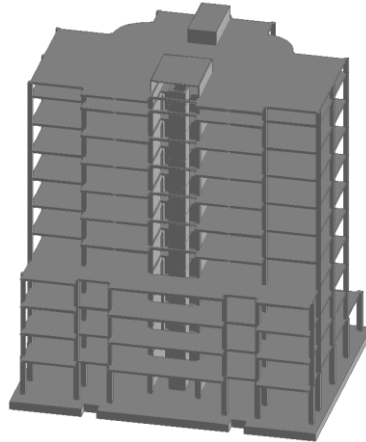


Рис. 2. Розрахункова схема будівлі

МСЕ розрахунок

Крок триангуляції

<input checked="" type="checkbox"/> плит	3 м	<input checked="" type="checkbox"/> 4-х вузлові СЕ	метод 1
<input type="checkbox"/> стін	3 м	<input checked="" type="checkbox"/> 4-х вузлові СЕ	метод 1
<input checked="" type="checkbox"/> генерувати елти фунда. плит	1,5 м	<input checked="" type="checkbox"/> 4-х вузлові СЕ	метод 1

Задати унікальні поверхні. (Задані)

Виділяти в суперелементи

<input type="checkbox"/> елементи перекриття поверху	Динаміка
<input type="checkbox"/> стіни	Кількість форм

Генерувати АЖТ колон і стін, що мають таку властивість

Жорсткість основи на зовні  Жорсткість паль на зовні (в долах від їх жорсткості на стіні)

Завантажити по ХУУ  Жорсткість фунда. плити на зовні 100 тс/м2

Враховувати поетапність спорудження з вирівнюванням рівнів перекриттів

В останньому етапі 3 поверхів  Об'єктом закінчувати етапи поверхів (п1,п2,п3...) 3,6,9,12

Збільшувати жорсткість ґрунту в окремих завантажених (подвійний розрахунок)

Сейсміка  Вітер  Кількість постів (с) в 1  Ж-сті паль (ЕФ) в 1

Враховувати нелінійну роботу бетону і арматури для:

<input type="checkbox"/> плит і балок	по всій будівлі
<input checked="" type="checkbox"/> стін і колон	по всій будівлі
<input type="checkbox"/> фунда. плит і фунда. балок	

Допустимість похибки

Виділення СЕ стін від площини стін	0,001 м
Виділення СЕ колонів від вертикальної осі колон	0,001 м

Використовувати результати МСЕ розрахунок:

результати сейсміч. розрахунок CDC

<input checked="" type="checkbox"/> Колони (розрахунок арматурно-експорт)	<input checked="" type="checkbox"/> Стіни (розрахунок арматури)
<input checked="" type="checkbox"/> Балки (розрахунок арматурно-експорт)	<input checked="" type="checkbox"/> Розриви (експорт)
<input checked="" type="checkbox"/> Фунд. плити (експорт)	<input checked="" type="checkbox"/> Палли (експорт)
<input checked="" type="checkbox"/> Фундаменти (включ розривів-розрахунок арматурно-експорт)	

Розрахунок арматури буде виконано одразу після МСЕ розрахунок  
Експорт буде виконано по команді Експорт в прог. констр. ПК МОНОМАКС-САПР

OK Відміна Довірка

Рис. 3. Діалогове вікно **МКЕ розрахунок** із опцією «Враховувати поетапність спорудження з вирівнюванням рівнів перекриттів»



Тобто, при цьому переміщення вузлів накопичуються із деяким вирівнюванням протягом процесу монтажу. Такий підхід відображає дійсний напружено-деформований стан будівлі [3].

У процесі автоматизованого проектування процес зведення будівлі був розділений на чотири етапи. На кожному етапі моделювання відбувалося шляхом зведення відповідної частини будівлі за допомогою надбудови верхніх поверхів. Результатом цього процесу стало створення остаточної розрахункової моделі будівлі.

На кожному етапі (рис. 4) програма робить фіксацію певного попереднього напружено-деформованого стану, який потенційно може вплинути на остаточний результат розрахунку.

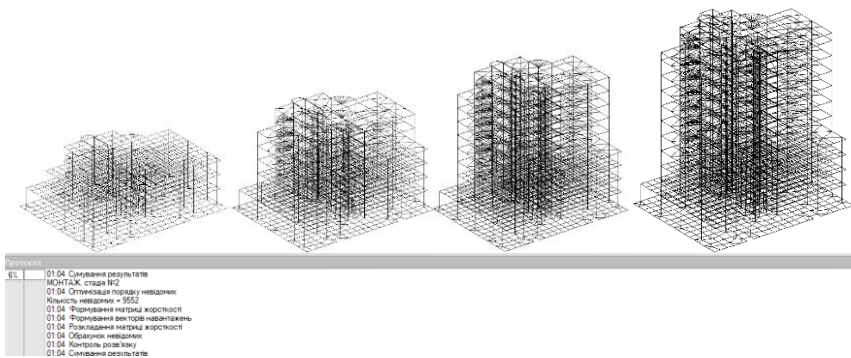


Рис. 4. Етапи зведення будівлі у вікні розрахункового процесора

На рис. 5 наведені деформовані схеми та ізополю переміщень розрахункової моделі по осі Z на всіх етапах зведення будівлі. У таблицях 1-3 – результати розрахунку конструктивних елементів будівлі при традиційному розрахунку та з урахуванням послідовності зведення.

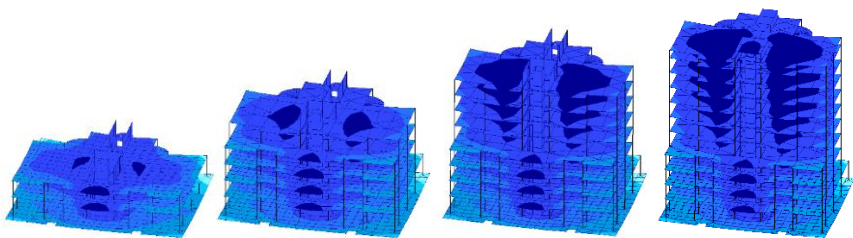


Рис. 5. Деформовані схеми та ізополю переміщень по Z на всіх етапах зведення

Таблиця 1

Поздовжні зусилля в колонах підвалу

Номер колони	Зусилля в колонах, кН			
	Традиційний розрахунок		Урахування послідовності зведення	
	min	max	min	max
1_8 сер	-1673,6	-1696,1	-1675,3 (+1%)	-1699,8 (+0,2%)
1_13 кр	-1332,8	-1357,3	-1317,9 (-11,1%)	-1342,4 (-1,1%)
1_15 сер	-2520,8	-2545,3	-2617,6 (+3,7%)	-2652,2 (+4%)
1_24 кр	-487,3	-511,9	-514,25 (+5,2%)	-538,8 (+5%)

Таблиця 2

Переміщення та зусилля у фундаментній плиті

Параметр	Екстремальні значення			
	Традиційний розрахунок		Урахування послідовності зведення	
	min	max	min	max
Переміщення по Z, мм	-37,9	-64,0	-37,5 (-1,06%)	-64,7 (+1,1%)
Mx, кНм/м	250,6	930,6	267,7 (+6,1%)	938,3 (+0,8%)
My, кН/мм	81,5	949,7	76,2 (-6,5%)	954,5 (+0,5%)
Qx, кН/м	-1450,3	1099,2	-1541,5 (+5,9%)	1107,2 (+0,7%)
Qy, кН/м	-523,7	1516,6	-524,9 (+0,2%)	1572,5 (+3,6%)

Таблиця 3

Переміщення та зусилля у плитах перекриттів 1, 10 поверхів

Параметр	Сполучення зусиль (екстремуми)			
	Традиційний розрахунок		Урахування послідовності зведення	
	min	max	min	max
1-й поверх				
Переміщення по Z, мм	-18,0	1,07	-16,9 (-6,1%)	1,07 (0%)
Mx, кН/м	-83,6	-5,57	-78,6 (-6%)	-5,25 (-0,4%)
My, кН/м	-118,7	1,03	-111,8 (-5,8)	0,97 (-5,8%)
Qx, кН/м	-7025,7	7025,8	-6617,8 (-5,8%)	6617,8 (-6,2%)
Qy, кН/м	-33,6	3508,9	-31,7 (-5,65%)	3305 (-5,8%)
10-й поверх				
Переміщення по Z, мм	-7,72	3,01	-6,86 (-11,1%)	2,48 (-17,6%)
Mx, кН/м	-75,6	0,51	-66,7 (-11,8%)	0,48 (-5,9%)
My, кН/м	-71,7	-2,76	-62,53 (-12,8)	-2,52 (-8,7%)
Qx, кН/м	-85,3	2086,7	-74,2 (-13%)	1918 (-8,1%)
Qy, кН/м	-33,3	769,5	-29,32 (-12%)	708,6 (-7,9%)

**Висновки.** Автоматизоване проектування монолітної багатоповерхової житлової будівлі виявило варіації результатів щодо напружено-деформованого стану елементів конструкції розрахункової схеми при розрахунку у двох режимах — традиційному та з урахуванням послідовності зведення. Зокрема, поздовжні зусилля майже в усіх колонах на нижньому поверсі показали тенденцію до збільшення (у діапазоні 0,2-5,2%) при врахуванні послідовності монтажу. Лише в крайніх колонах Км-13 (Км-16) спостерігалось зниження від 1,1% до 11,1%. Переміщення фундаментної плити показали незначні зміни (від -1,06% до +1,1%), при цьому згинальні моменти зросли до 6,1%, а поперечні сили – до 5,9%.

Для плит перекриття вертикальні переміщення (їх екстремальні значення) уздовж осі Z зменшилися, при цьому для плити першого поверху – на 6,1%, плити 10-го поверху – на 17,6%. Зміни зусиль коливалися від 0,4% до 6,2% і від 5,9% до 13%, відповідно. Ці зміни можна пояснити зменшенням осідання колон при врахуванні процесу зведення. У традиційному розрахунку всі навантаження одночасно прикладались на розрахункову схему, що призводить до дещо більших переміщень. І навпаки, при розгляді послідовності монтажу навантаження накопичуються поступово, що призводить до менших переміщень на кожному поверсі і, як наслідок, до помітної різниці переміщень на верхніх поверхах.

Таким чином, порівняння результатів НДС показує, що різниця між обома варіантами розрахунку незначна на нижніх поверхах, але стає більш вираженою на верхніх поверхах, особливо зі збільшенням висоти будівлі.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що розрахунок із урахуванням послідовності зведення є важливим для багатоповерхівок, виконувати його необхідно, особливо – для будівель із високим рівнем відповідальності. Цей підхід дозволяє реалістично оцінити експлуатаційну поведінку всіх конструктивних елементів, полегшуючи точне проектування та потенційно знижуючи витрати на будівництво завдяки оптимізованому використанню арматури та бетону. Більше того, він мінімізує ризики, пов'язані з локальними руйнуваннями та надзвичайними ситуаціями протягом усього життєвого циклу конструктивних елементів будівель і споруд.

## References

1. DBN V.1.2-14:2018. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budiveli i sporud. Diisnyi z 01.01.2019. Minrehionbud ta ZhKH Ukrainy. Kyiv, 2018. 30 s.
2. DBN V.2.2-41:2019. Vysotni budivli. Osnovni polozhennia. Chynnyi vid 01.01.2021. Kyiv: Mnhrehion Ukrainy, 2021. 53 s.
3. Barabash M. S. Kompiuternoe modelirovaniye protsessov zhyznennoho tsykla ob'ektov stroytelstva: Monohrafiya / Maryia Serheevna Barabash. K.: Yzd-vo «Stal», 2014. 301 s.

4. Barabash M. S. Kompiuternoe modelyrovanye protsessov zhyznennoho tsykla konstruksyi / M. S. Barabash, Yu. V. Henzerskiy // Mistobuduvannya ta terytorialne planuvannya: Nauk-tekh. zbirnyk. K.: KNUBA, 2013. № 47. S. 83–89.

5. Horodetskiy A. S. Kompiuternoe modelyrovanye protsessa vozvedeniya stroytelnykh konstruksyi / A. S. Horodetskiy, M. S. Barabash // Stroytelnaia mekhanyka y raschet sooruzheniy. 2014, № 5. S. 28 - 33.

6. Horodetskiy, A.S. Kompiuternoe modelyrovanye v zadachakh stroytelnoi mekhanyky: Uchebnoe posobie / A.S. Horodetskiy, M.S. Barabash, V.N. Sydorov. Yzdatelstvo ASV, 2016. 338 s.

7. Horodetskiy A.S. MONOMAKh-SAPR - prohrammnyi kompleks dlia avtomatyzirovannoho proektyrovaniya zhelezobetonnykh y armokamennykh konstruksyi mnohoetazhnykh karkasnykh zdaniy / A.S. Horodetskiy, A.A. Lazarev // Novye kompiuternye tekhnolohyy, 2011. № 1 (9). S. 38-41.

8. Perelmutter A.V. SCAD++. Rezhym MONTAZh. Fizychni aspekty. [https://www.youtube.com/watch?v=J15B1nub0c4&ab\\_channel=SCADSoft](https://www.youtube.com/watch?v=J15B1nub0c4&ab_channel=SCADSoft)

9. Rotko S.V., Bulda K.O., Artemuk T.S. Urakhuvannya poslidorovnosti zvedeniia na NDS konstruksii pry avtomatyzovanomu proiektuvanni budivel i sporud // Suchasni problemy mistobuduvannya. Perspektyvy ta priorytety rozvytku: zbirnyk tez dopovidei mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii, 17 lystopada 2023 r., m. Lutsk [Elektronnyi resurs]. Lutsk: LNTU, 2023. S. 95-96. URL: <https://konf-mbg.wixsite.com/lntu-bci-mbg-2023>

### Література

1. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Дійсний з 01.01.2019. Мінрегіонбуд та ЖКГ України. Київ, 2018. 30 с.

2. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. Чинний від 01.01.2021. Київ: Мнрегіон України, 2021. 53 с.

3. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография / Мария Сергеевна Барабаш. К.: Изд-во «Сталь», 2014. 301 с.

4. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла конструкций / М. С. Барабаш, Ю. В. Гензерский // Містобудування та територіальне планування: Наук-техн. збірник. К.: КНУБА, 2013. № 47. С. 83–89.

5. Городецкий А. С. Компьютерное моделирование процесса возведения строительных конструкций / А. С. Городецкий, М. С. Барабаш // Строительная механика и расчет сооружений. 2014, № 5. С. 28 - 33.

6. Городецкий, А.С. Компьютерное моделирование в задачах строительной механики: Учебное пособие / А.С. Городецкий, М.С. Барабаш, В.Н. Сидоров. Издательство АСВ, 2016. 338 с.

7. Городецкий А.С. МОНОМАХ-САПР - программный комплекс для автоматизированного проектирования железобетонных и армокаменных конструкций многоэтажных каркасных зданий / А.С. Городецкий, А.А. Лазарев // Новые компьютерные технологии, 2011. № 1 (9). С. 38-41.

8. Перельмутер А.В. SCAD++. Режим МОНТАЖ. Фізичні аспекти. [https://www.youtube.com/watch?v=J15B1nub0c4&ab\\_channel=SCADSoft](https://www.youtube.com/watch?v=J15B1nub0c4&ab_channel=SCADSoft)

9. Ротко С.В., Булда К.О., Артемук Т.С. Урахування послідовності зведення на НДС конструкцій при автоматизованому проектуванні будівель і споруд // Сучасні проблеми містобудування. Перспективи та пріоритети розвитку: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 17 листопада 2023 р., м. Луцьк [Електронний ресурс]. Луцьк: ЛНТУ, 2023. С. 95-96. URL: <https://konf-mbg.wixsite.com/lntu-bci-mbg-2023>

## РОБОТА ДЕРЕВИНИ В УМОВАХ ПРІСНИХ І МОРСЬКИХ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ

### THE WORK OF WOOD IN FRESH AND MARINE WATER ENVIRONMENTS

**Рошук М.М., аспірант, Гомон Св.Св., д.т.н., проф. (Національний  
університет водного господарства та природокористування, Рівне)**

**Roshchuk M.M., postgraduate, Homon S.S., Dh.D., professor  
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)**

*Проведено аналіз роботи деревини за різної вологості. Встановлено, що фактично відсутні експериментально-теоретичні дослідження механічних властивостей деревини за тривалої експлуатації у водному середовищі (річковому та морському). Наведено об'єм подальших досліджень.*

*Wooden elements and structures are also used quite often in the construction of industrial, civil facilities and engineering structures. They include beams, trusses, arches, scaffolding, rafter systems, decking, purlins, and columns. We will be especially interested in the work of elements and structures that are affected by aggressive water environments. These include fresh and marine. The operation of such elements and structures can be found during the operation of engineering structures (bridges, bridge crossings, sea piers, shore-fortifying engineering structures) under such operating conditions.*

*In the middle of the last century, German researchers Kollmann F., Kuffner M. established that with an increase in the moisture content of wood, its main mechanical properties deteriorate (from 10 to 30%). In particular, it was established that the temporary strength of wood increases when stretched along the fibers at a moisture content of 0 to 10%, and decreases continuously from 10 to 30%. At a humidity of more than 30% this indicator is unchanged.*

*According to regulatory documents, the mechanical characteristics of materials are calculated and given at a standard humidity of 12% and a temperature of 20 °C for samples of clean wood with a section of 20x20x30mm. If they are operated at a different humidity and temperature, they are recalculated to the standard humidity.*

*References and standards also present conversion coefficients of the relationship between strength (for compression along the fibers, chipping, bending) and moisture content of wood.*

*Homon St.St. the change of the main mechanical characteristics under axial compression along the fibers of deciduous and coniferous species at a moisture content*

of 12 to 30% already under a strict test regime was established. The author proposed methods for determining critical and limit deformations at different moisture levels; complete wood deformation diagrams are constructed. A model of the real work of wood under axial compression along the fibers is proposed.

Therefore, in the future, it is necessary to carry out experimental and theoretical studies of the mechanical properties of wood of various species under various types of load and during long-term operation in the water environment (river and sea).

*Ключові слова: деревина, водне прісне середовище, морське середовище, механічні властивості, міцність.*

*Keywords: wood, fresh water environment, marine environment, mechanical properties, strength.*

**Постановка проблеми.** Матеріали та вироби з деревини ми зустрічаємо кожного дня в повсякденному житті. Оскільки, деревина є природним матеріалом, то вироби та матеріали з неї є цілком безпечними та екологічно чистими. Дерев'яні елементи та конструкції застосовуються також досить часто при будівництві промислових, цивільних об'єктів та інженерних споруд. До них можна віднести балки, ферми, арки, риштування, кроквяні системи, настили, прогони, колони. Нас буде особливо цікавити робота елементів та конструкцій, які зазнають впливу агресивних водних середовищ. До таких можливо віднести прісне та морське. Роботу таких елементів та конструкцій можна зустріти при роботі інженерних споруд (мостів (рис.1), мостових переходів (рис.2), морських пірсів (рис.3), берегоукріплюючих інженерних споруд (рис.4)) за таких умов експлуатації.

Отже, в даній статті ми спробуємо проаналізувати роботу деревини у різних прісних та морських водних середовищах.

**Аналіз відомих досліджень і публікацій.** Дослідженням механічних властивостей деревини займався досить велика кількість вчених зі всього світу [1-4]. Роботу деревини за різної вологості знаходимо у працях таких дослідників як Kollmann F. [5], Kuffner M. [6], Thygesen L. [7], Madsen B. [8], Báder M. [9], Németh R.[9], Vasic S. [10], Stanzl-Tschegg S. [10], Гомон Св.Св. [11-17]. Як правило, такі дослідження проводились до точки критичних деформацій деревини, а то і нижче, окрім експериментальних досліджень Гомона Св.Св. [10-12, 16, 17].



Рис. 1. Найдовший дерев'яний залізничний міст в Європі через річку Стир (Рівненська область)



Рис. 2. Мостовий перехід в Пуці-Водиці, Київ



Рис.3. Найдовший в Європі морський пірс в місті Сопот (довжина пірсу 650 м, з них в морі 450 м)



Рис.4. Берегоукріплення водойми дерев'яними палями

**Метою даної статті** є проведення аналізу роботи деревини за різної вологості, тобто ті дослідження, які ми маємо на даний час, а також запропонуємо обсяг подальших експериментально-теоретичних досліджень з даного питання.



**Основна частина.** Отже, проаналізуємо, які експериментально-теоретичні дослідження проведені на даний час за даною проблематикою.

Ще фактично в середині минулого століття німецькі дослідники Kollmann F. [5], Kuffner M. [6] встановили, що зі збільшенням вологості деревини основні її механічні властивості погіршуються (від 10 до 30%). Зокрема, було встановлено, що за розтягу вздовж волокон тимчасова міцність деревини за вологості від 0 до 10% збільшується, а від 10 до 30% постійно зменшується (рис.5). За вологості більшої 30% цей показник є незмінним.

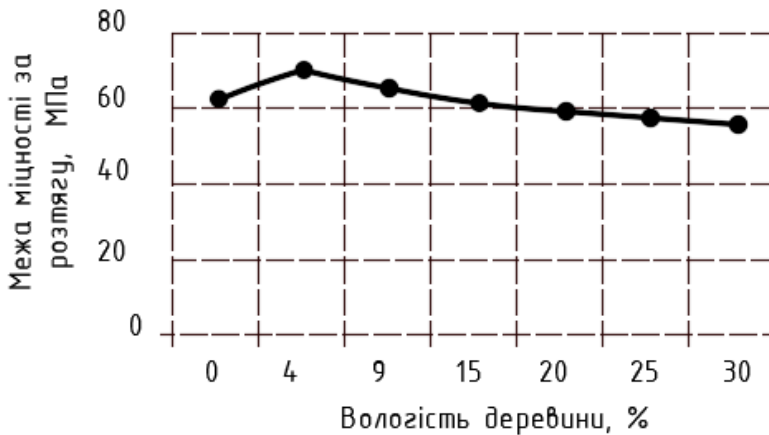


Рис. 5. Гранична міцність деревини на розтягу вздовж волокон залежно від вологості [6]

Зміна модуля пружності носить приблизно той же характер тільки з іншими цифровими показниками.

Згідно нормативних документів механічні характеристики матеріалів розраховуються та представлені для зразка чистої деревини перерізом 20x20x30 мм при стандартній вологості 12% і температурі 20<sup>0</sup>С. Якщо матеріал експлуатується при іншій вологості і температурі, то він перераховується на стандартну вологість за наступною залежністю

$$B_{12} = B_w \cdot (1 + \alpha(W - 12)) \quad (1)$$

Довідники та стандарти надають коефіцієнти перерахунку для зв'язку між міцністю (за осьового стиску вздовж волокон, згинання, сколювання) і вологістю деревини, також у вигляді графіка залежності «гранична міцність-вологість». За 1 взято граничну міцність деревини при стандартній вологості 12% (рис. 6).

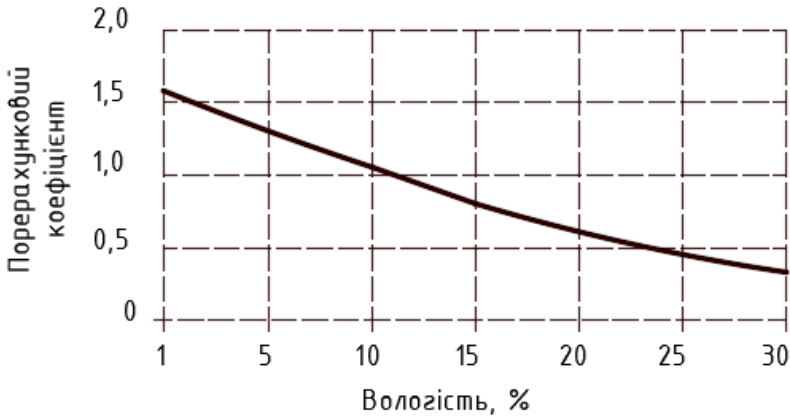


Рис.6. Графік перерахункових коефіцієнтів для вологості на стиск вздовж волокон

Гомоном Св.Св. встановлено зміну основних механічних характеристик за осьового стиску вздовж волокон листяних та хвойних порід за вологості від 12 до 30% вже за жорсткого режиму випробувань, тобто в докритичній та закритичній стадії роботи матеріалу [10-17]. Виявлено, що за вологості більше 30% механічні властивості деревини практично не змінюються. Автором запропоновано методики для визначення критичних та граничних деформацій за різної вологості; побудовано повні діаграми деформування деревини (рис.7) [10-12, 16, 17]. Автором запропоновано модель реальної роботи деревини при осьовому стисненні вздовж волокон (рис.8) [10]. Автор виділив пружну та пластичну складові деформацій. Дослідник зазначив, що зі збільшенням вологості від 12 до 30% деформівність деревини зростає.

В подальшому нас буде цікавити робота деревини за тривалої експлуатації у водному середовищі (річковому та морському) за короточасних та повторних навантажень, враховуючи при цьому необхідно змодельовати рівень води, хвилі в морі, течію в річках та інші не менш цікаві фактори впливу. Тому необхідно провести експериментально-теоретичні дослідження механічних властивостей деревини різних порід за різних видів навантаження та за вище наведених експлуатаційних впливів та факторів.

Таких досліджень є дуже мало в світовій практиці.

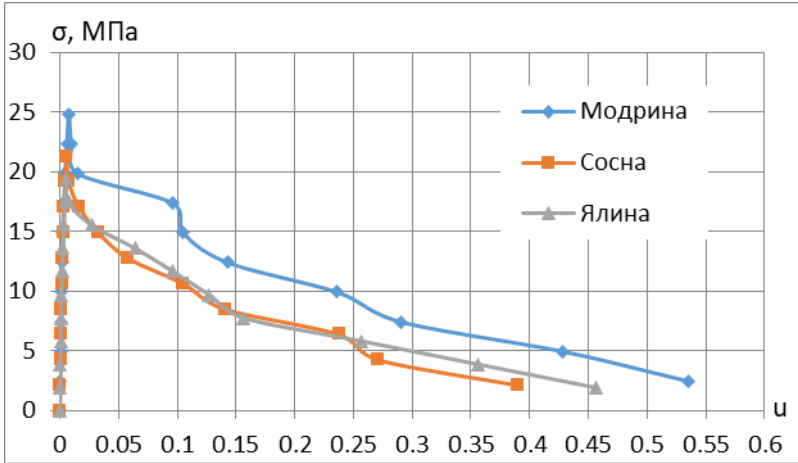


Рис.7. Дійсні (повні) діаграми деформування суцільної деревини хвойних порід віком 60 років за вологості 30% [10-12, 16]

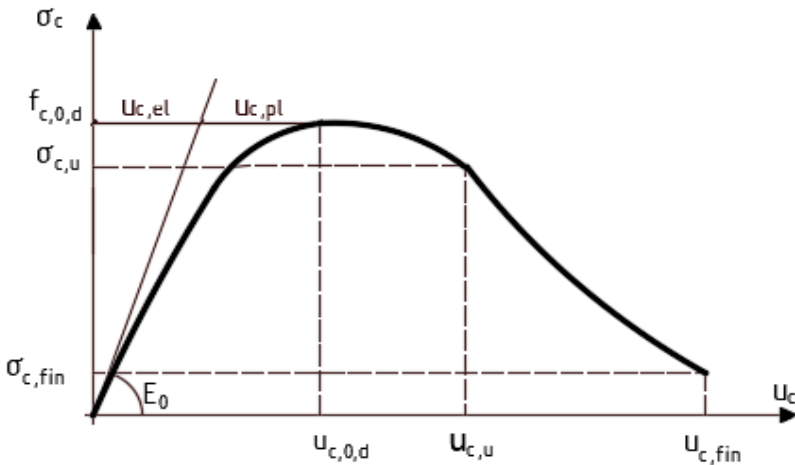


Рис.8. Модель дійсної роботи деревини осьовим стиском вздовж волокон за різної вологості [10]

### Висновки

1. Проведено аналіз роботи деревини за різної вологості.

2. Встановлено, що фактично відсутні експериментально-теоретичні дослідження механічних властивостей деревини за тривалої експлуатації у водному середовищі (річковому та морському).

3. Наведено об'єм подальших досліджень.

## References

1. Landis E.N., Vasic, S., Davids W.G., Parrod, P. (2002). Coupled experiments and simulations of microstructural damage in wood. *Experimental Mechanics* 42, Pp. 389–394.

2. Zakic B.D. (1974). Inelastic bending of wood beams. *Journal of the Structural Division* 99(10), Pp. 2079-2092.

3. Patton-Mallory M., Cramer S. (1987). Fracture mechanics: a tool for predicting wood component strength. *Forest Products Journal* 37 (7/8), Pp. 39–47.

4. Green D.W., Kretschmann D.E. (1992). Properties and grading of Southern Pine Woods. *Forest Products Journal* 47 (9), Pp. 78–85.

5. Kollmann F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Bd. I. Berlin, 1951. 1050 s.

6. Kuffner M. Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit von Holz Verschiedenen Rohdichte in Abhängigkeit von Feuchtigkeitgehalt. Holz als Roh- und Werkstoff, 1978, 11, Pp. 435–440.

7. Thygesen L.G., Tang Engelund E., Hofmeyer P. (2010). Water sorption in wood and modified wood at high values of relative humidity. Part I: Results for untreated, acetylated, and furfurylated Norway spruce. *Holzforsch* 64, Pp. 315-323.

8. Madsen B. (1982). Recommended moisture adjustment factor for lumber stresses. *Civil Engineering* 9(4), Pp. 602–610.

9. Vasic S., Stanzl-Tschegg S. (2007). Experimental and numerical investigation of wood fracture mechanisms at different humidity levels. *Holzforschung* 61, Pp. 367-374.

10. Homon Sv.Sv., Yasniy P.V., Homon P.S., Yasniy V.P. Kласична модель роботи сутіліної та модифікованої деревини ос'овим стиском вздовж волокон: монографія. Тернопіль: ТНТУ, 2023. 316 с.

11. Yasniy P.V., Homon S.S. Doslidzhennya sichnykh moduliv lystyanykh ta khvoynykh porid derevyny z riznym pokaznykom volohosti. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu*. Vinnytsya: VNTU, 2020. Vyp. 4 (151). S. 125–130.

12. Yasniy P.V., Homon S.S. Eksperymental'ni doslidzhennya sutil'noyi derevyny konstruktivnykh rozmiriv z vrakhuvanniam faktora volohosti. *Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktivni v budivnytvi*. Vinnytsya: VNTU, 2020. Tom 28. №1. S. 41–48.

13. Homon Sv.Sv., Matviyuk O.V., Dovbenko T.O., Savchuk S.M., Vereshko O.V., Kulakovskyy L.YA. Doslidzhennya mitsnisnykh pokaznykiv derevyny pid vplyvom ahresyvnoho seredovyshcha. *Resursoekonomni materialy, konstruktivni, budivli ta sporudy*. Rivne: NUVHP, 2021. Vyp. 40. S. 10-17.

14. Homon Sv.Sv., Homon Sv.St., Matviyuk O.V., Vereshko O.V., Chornomaz N.YU. Zastosuvannya derevyny v umovakh ahresyvnnykh seredovyshch. *Suchasni tekhnolohiyi ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. Luts'k: LNTU, 2022. Vyp.17. S. 15–22.

15. Homon Sv.Sv., Matviyuk O.V., Savchuk S.M., Vereshko O.V., Kulakovs'kyi L.YA. Vplyv ahresyvnoho seredovyshcha na mitsnisni ta deformivni pokaznyky sutsil'noyi derevyny khvoynykh porid. *Visnyk Natsional'noho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannya. Seriya «Tekhnichni nauky»*. Rivne: NUVHP, 2021. Vypusk 2(94). S. 69–80.

16. Homon S., Litnitsky S., Gomon P., Kulakovskiy L., Kutsyna I. (2023). Methods for determining the critical deformations of wood with various moisture content. *Scientific Horizons*, 26(1), 73-86.

17. Janiak T., Homon S., Karavan V., Gomon P., Gomon S.S., Kulakovskiy L., Famulyak Y. (2023). Mechanical properties of solid deciduous species wood at different moisture content. *AIP Conference Proceedings* 2949, article number 020009.

### Література

1. Landis E.N., Vasic, S., Davids W.G., Parrod, P. (2002). Coupled experiments and simulations of microstructural damage in wood. *Experimental Mechanics* 42, Pp. 389–394.

2. Zakic B.D. (1974). Inelastic bending of wood beams. *Journal of the Structural Division* 99(10), Pp. 2079-2092.

3. Patton-Mallory M., Cramer S. (1987). Fracture mechanics: a tool for predicting wood component strength. *Forest Products Journal* 37 (7/8), Pp. 39–47.

4. Green D.W., Kretschmann D.E. (1992). Properties and grading of Southern Pine Woods. *Forest Products Journal* 47 (9), Pp. 78–85.

5. Kollmann F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Bd. I. Berlin, 1951. 1050 s.

6. Kuffner M. Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit von Holz Verschiedenen Rohdichte in Abhängigkeit von Feuchtigkeitsgehalt. Holz als Roch und Werkstoff, 1978, 11, Pp. 435–440.

7. Thygesen L.G., Tang Engelund E., Hofmeyer P. (2010). Water sorption in wood and modified wood at high values of relative humidity. Part I: Results for untreated, acetylated, and furfurylated Norway spruce. *Holzforsch* 64, Pp. 315-323.

8. Madsen B. (1982). Recommended moisture adjustment factor for lumber stresses. *Civil Engineering* 9(4), Pp. 602–610.

9. Vasic S., Stanzl-Tschegg S. (2007). Experimental and numerical investigation of wood fracture mechanisms at different humidity levels. *Holzforschung* 61, Pp. 367-374.

10. Гомон Св.Св., Ясній П.В., Гомон П.С., Ясній В.П. Класична модель дійсної роботи суцільної та модифікованої деревини осьовим стиском вздовж волокон: монографія. Тернопіль: ТНТУ, 2023. 316 с.

11. Ясній П.В., Гомон С.С. Дослідження січних модулів листяних та хвойних порід деревини з різним показником вологості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця: ВНТУ, 2020. Вип. 4 (151). С. 125–130.

12. Ясній П.В., Гомон С.С. Експериментальні дослідження суцільної деревини конструкційних розмірів з врахуванням фактора вологості. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: ВНТУ, 2020. Том 28. №1. С. 41–48.

13. Гомон Св.Св., Матвіюк О.В., Довбенко Т.О., Савчук С.М., Верешко О.В., Кулаковський Л.Я. Дослідження міцнісних показників деревини під впливом агресивного середовища. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2021. Вип. 40. С. 10-17.

14. Гомон Св.Св., Гомон Св.Ст., Матвіюк О.В., Верешко О.В., Черномаз Н.Ю. Застосування деревини в умовах агресивних середовищ. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк: ЛНТУ, 2022. Вип.17. С. 15–22.

15. Гомон Св.Св., Матвіюк О.В., Савчук С.М., Верешко О.В., Кулаковський Л.Я. Вплив агресивного середовища на міцнісні та деформівні показники суцільної деревини хвойних порід. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки»*. Рівне: НУВГП, 2021. Випуск 2(94). С. 69–80.

16. Homon S., Litnitsky S., Gomon P., Kulakovskiy L., Kutsyna I. (2023). Methods for determining the critical deformations of wood with various moisture content. *Scientific Horizons*, 26(1), 73-86.

17. Janiak T., Homon S., Karavan V., Gomon P., Gomon S.S., Kulakovskiy L., Famulyak Y. (2023). Mechanical properties of solid deciduous species wood at different moisture content. *AIP Conference Proceedings* 2949, article number 020009.

## INVESTIGATION OF CHANGES IN HIGH TEMPERATURE PERFORMANCE OF ASPHALT CONCRETE UNDER ULTRAVIOLET RADIATION

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОНУ ПІД ДІЄЮ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Serdyuk V.R., Doctor of Technical Sciences, Prof., Kots I.V., Ph.D. in Engineering, Prof. (Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia)**

**Сердюк В.Р., д.т.н., проф., Коц І.В., к.т.н., проф. (Вінницький національний технічний університет, Вінниця)**

*In recent years, asphalt concrete pavement is being a large number of applications, and gradually appeared a number of pavement damage problems, especially in the strong ultraviolet and high temperature environment of asphalt concrete pavement, because of long-term exposure to ultraviolet radiation, resulting in high-temperature durability of the pavement deteriorated year by year. In this paper, the number of UV aging cycles, aging temperature and UV radiation intensity on the rutting depth and dynamic stability are investigated through high temperature rutting test. The test results show that: for asphalt concrete, the number of UV aging cycles has a more pronounced effect on dynamic stability and rut depth compared to aging temperature and UV radiation intensity.*

*З постійним розвитком транспортної інфраструктури та збільшенням попиту на перевезення, асфальтобетон отримав широке застосування як основний дорожній матеріал. Його експлуатаційні характеристики в умовах високих температур мають значний вплив на довговічність і безпеку доріг. У багатьох регіонах спекотна погода та інтенсивне ультрафіолетове випромінювання є поширеними кліматичними характеристиками, які впливають на довговічність асфальтобетону. В умовах високих температур асфальтобетонне покриття схильне до появи тріщин, деформацій та руйнування, що безпосередньо впливає на довговічність дорожнього покриття та безпеку дорожнього руху.*

*З метою вивчення впливу ультрафіолетового випромінювання на високотемпературні властивості асфальтобетону, за допомогою проведення високотемпературного випробування на утворення колії, було встановлено залежності між кількістю циклів ультрафіолетового витримування, температурою витримування та інтенсивністю ультрафіолетового випромінювання на глибину колії та динамічну стійкість за допомогою проведення високотемпературного випробування на утворення колії.*

*Результати випробувань показують, що за умови постійної інтенсивності*

УФ-випромінювання і температури випробувань, при збільшенні кількості циклів ультрафіолетового випромінювання глибина колії на поверхні зразка асфальтобетону збільшується зі збільшенням кількості циклів ультрафіолетового випромінювання, натомість динамічна стійкість зменшується. Результати експериментів підтверджують, що при поступовому збільшенні інтенсивності УФ-випромінювання його вплив на глибину колії на поверхні асфальтобетонного зразка поступово зменшується. Для асфальтобетону кількість циклів УФ-випромінювання має більш виражений вплив на динамічну стійкість і глибину колії порівняно із зміною температури при випробуванні та інтенсивністю УФ-випромінювання.

*Key words: asphalt concrete, high temperature performance, ultraviolet radiation, dynamic stability, temperature.*

*Ключові слова: асфальтобетон, високотемпературні характеристики, ультрафіолетове випромінювання, динамічна стійкість, зміна температури.*

**Introduction.** With the intensification of climate change and the increase in transportation demand, asphalt concrete, as one of the main pavement materials in road construction, is subjected to increasingly severe environmental tests[1][2]. In the process of road service, asphalt concrete experiences the influence of various natural climatic conditions, among which high temperature environment is a factor of great concern. Under high-temperature weather, asphalt concrete pavement is prone to face problems such as cracking, deformation and damage, which directly affects the service life of the road and traffic safety[3][4].

Ultraviolet (UV) radiation is an important influence in high-temperature environments, and its energy intensity and frequency make it a major factor in the high-temperature performance of asphalt concrete[5][6]. Prolonged exposure to UV light may cause aging and photo-oxidation of asphalt in asphalt concrete, which may lead to the degradation of pavement performance[7][8]. However, in-depth studies on the changes in the high-temperature properties of asphalt concrete under UV radiation have been relatively limited to date.

**Raw materials and gradation.** The experiment was conducted with SBS-C modified asphalt, and the relevant technical specifications are shown in Table 1.

Table 1

SBS modified asphalt specifications and requirements

Index	Test Result	Requirement
Penetration (25 °C, 100 g.5s)/0.1 mm	66	60~80
Extensibility (5 °C)/cm	47	≥30
Softening Point/°C	78	≥55
Density (15 °C)/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.027	—



SMA-13 asphalt concrete was utilized for the experiment, and the gradation is shown in Table 2.

**Test methods.** In this paper, ultraviolet radiation intensity, ultraviolet radiation cycle times and temperature of the three factors to analyze the impact of ultraviolet radiation on the high temperature performance of asphalt concrete. Respectively selected 0, 100 W/m<sup>2</sup>, 200 W/m<sup>2</sup>, 300 W/m<sup>2</sup> of these ultraviolet radiation intensities; ultraviolet radiation cycle times in order to simulate the actual road surface as far as possible and selected the radiation time of 12 ~ 13h, non-radiation time of 11 ~ 12h; at the same time, the temperature selection of 15 ~ 40 °C and 25 ~ 50 °C of the alternating transformation.

Table 2

Gradation of SMA-13 asphalt concrete

SMA-13		Lower limit	Upper limit	Graduate median	Synthetic gradation
Percentage of mass passing through the following sieve pores (mm), %	16	100	100	100	100
	13.2	90	100	95	96.4
	9.5	50	75	62.5	60.7
	4.75	20	34	27	27.3
	2.36	15	26	20.5	21.4
	1.18	14	24	19	17.9
	0.6	12	20	16	15.8
	0.3	10	16	13	13.7
	0.15	9	15	12	11.1
	0.075	8	12	10	10.6

The indoor ultraviolet light accelerated aging test chamber: the test chamber includes temperature automatic regulator, the timer, and has a double wall. The light source of the accelerated UV aging test system takes 1000W straight tube high-pressure mercury lamp, the control temperature of the high-pressure mercury lamp is 40-60 °C, the main peak of the UV energy spectrum is 365 nm, and the acquisition of different UV radiation intensities is realized by adjusting the position of the transformation conversion layer.

The prepared specimens are firstly placed in 40°C or 50°C UV accelerated aging tester, and kept under the specified radiation intensity for 12 ~ 13h, then the specimens are removed and placed in 15°C or 20°C environment for 11 ~ 12h, and this process is treated as a complete UV aging cycle, and then 5, 10, 15 and 25 UV aging cycles will be carried out next.

Referring to the specification requirements, the high temperature performance of SMA-13 asphalt concrete was evaluated by the rut depth and dynamic stability in the rut test.

**Analysis of test results.** According to the above test method, different test conditions are adopted for asphalt concrete to carry out the test of UV aging cycle. Among them, the same temperature were taken 4 kinds of UV radiation intensity and 4 kinds of cycle times, a total of 16 groups of tests, in which each group of tests need to carry out 6 parallel tests, and the average value of these 6 tests as the results of the group. Meanwhile, a group of specimens not treated with the UV aging cycle was taken as a control group with the rut depth of 1.596 mm and the dynamic stability of 4841 cycles/mm. The changes of rutting depth of asphalt concrete under different UV aging cycle conditions are shown in Figure 1.

Along with the increase of the number of UV aging cycles, the rut depth of asphalt concrete gradually increased. In the case of UV radiation intensity of 200 W/m<sup>2</sup>, the rut depth of asphalt concrete increased by 31.1%, 41.8%, 53.3%, and 65.3% when the temperature is 15 ~ 40°C, after 5, 10, 15, and 25 UV aging cycles, respectively. While the rut depth increased by 36.8%, 51.4%, 61.4%, and 75.6% when the temperature is 25 ~ 50°C. The data show that when the number of UV aging cycles increases, other conditions remain unchanged, the rut depth of asphalt concrete is also gradually increasing, and the increasing trend is more and more obvious, indicating that the high temperature resistance to deformation of asphalt concrete is the worse.

When the intensity of UV radiation increases, the rut depth of asphalt concrete also increases gradually. Take the case of 10 times of UV aging cycle as an example, when the temperature is 15 ~ 40 °C, the UV radiation intensity of 0, 100 W/m<sup>2</sup>, 200 W/m<sup>2</sup> and 300 W/m<sup>2</sup> conditions, after 10 times of UV aging cycle, the rut depth of the asphalt concrete is respectively increased by 14.5%, 33.2%, 41.8%, 49.0%. The rutting depth of asphalt concrete increased by 20.1%, 37.9%, 50.3%, and 61.3% when the temperature was 25 ~ 50°C. The rutting depth of asphalt concrete increased by 20.1%, 37.9%, 50.3%, and 61.3%, respectively. This set of data can show that the rutting depth of asphalt concrete

is significantly increased with the intensity of UV radiation, and its high temperature deformation resistance is getting worse and worse, of which, when the temperature interval is 25 ~ 50 °C, the rut depth of the increasing trend is more obvious.

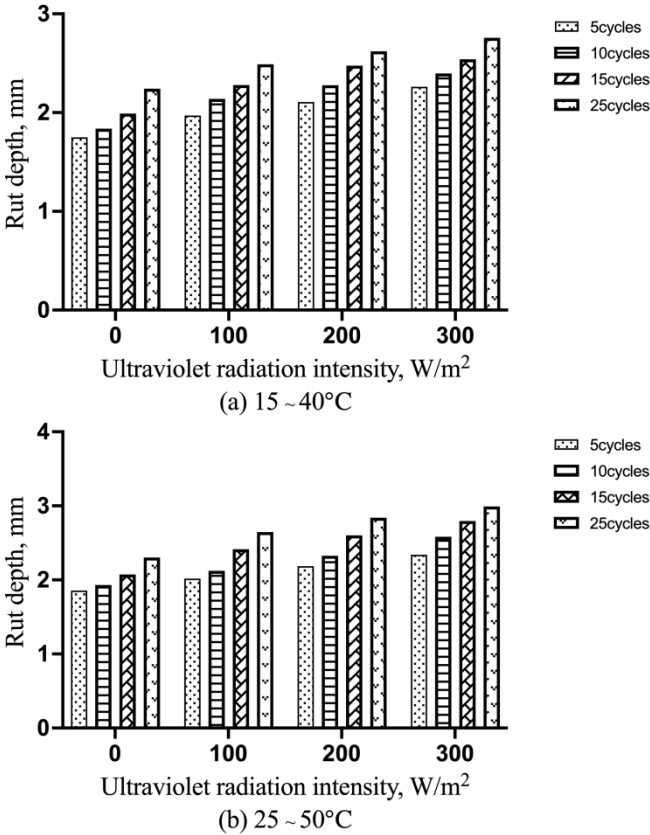


Fig. 1 Variation of rut depth of asphalt concrete under different ultraviolet aging cycle conditions

And from the selection of different test temperatures, it can be seen that the rut depth increased by 15% - 20% when the UV radiation intensity was from 0 to 100 W/m<sup>2</sup>, about 10% when the UV radiation intensity was from 100 W/m<sup>2</sup> to 200 W/m<sup>2</sup>, and about 8% when the UV radiation intensity was from 200 W/m<sup>2</sup> to 300 W/m<sup>2</sup>. These experimental results show that when the intensity of

UV radiation increases gradually, its effect on the rut depth of asphalt concrete is gradually reduced. These experimental results show that when the intensity of UV radiation increases gradually, its effect on the rutting depth of asphalt concrete is gradually reduced. The reason for this phenomenon is mainly in the same number of UV aging cycles, asphalt concrete is only affected by the temperature; and when there is the intensity of UV radiation, the mixture is subjected to temperature and UV light, UV radiation makes the asphalt in the mixture aging, resulting in a reduction in the aggregate cohesion in the mixture, which in turn causes the rut depth of the asphalt concrete to occur more significantly.

The variations of dynamic stability of asphalt concrete under different UV aging cycle conditions are shown in Fig. 2.

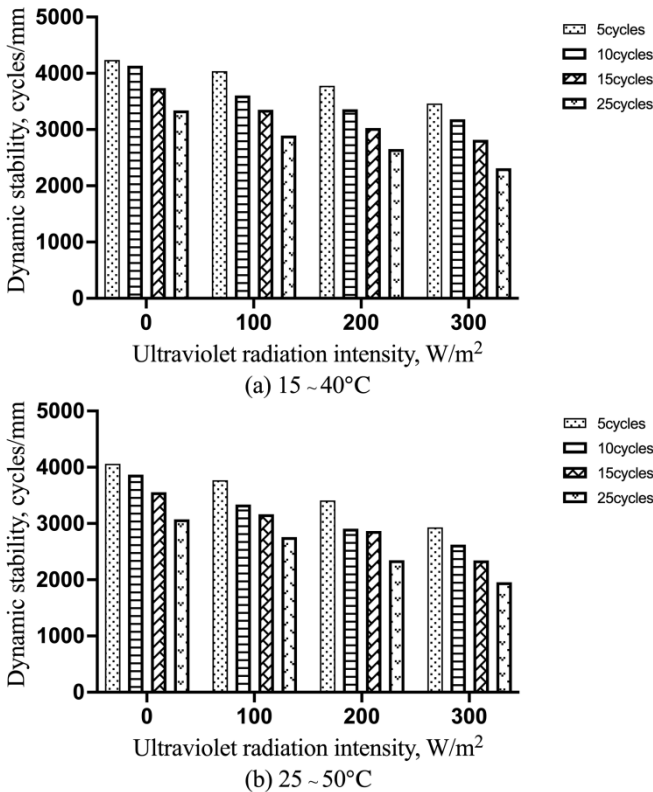


Fig. 2 Variation of dynamic stability of asphalt concrete under different ultraviolet aging cycle conditions

The dynamic stability of asphalt concrete decreased by 29.2%, 34.1%, 42.1%, and 52.1% after 5, 10, 15, and 25 UV aging cycle tests at temperature of 15 ~ 40°C with 300 W/m<sup>2</sup> UV radiation intensity, respectively. The dynamic stability of asphalt concrete decreased by 37.4%, 45.0%, 51.4%, and 59.3%, respectively, when the temperature was 25 ~ 50°C and the same UV radiation intensity was maintained. This indicates that the dynamic stability of asphalt gradually decreases with the increase of the number of UV aging cycles, while its attenuation shows an increasing trend, and the high temperature performance of the mixture is a little worse when the temperature is 25 ~ 50°C.

When the temperature interval was 15 ~ 40°C, the dynamic stability of asphalt concrete decreased by 22.6%, 30.5%, 36.7%, and 42.1% after 15 UV aging cycles when the UV radiation intensities were 0, 100 W/m<sup>2</sup>, 200 W/m<sup>2</sup>, and 300 W/m<sup>2</sup>, respectively, while when the temperature interval was 25 ~ 50°C, the dynamic stability of asphalt concrete decreased by 26.3%, 34.2%, 40.4%, and 51.6%, respectively. The data show that the dynamic stability of asphalt concrete is related to the intensity of UV radiation, and the dynamic stability tends to decrease with the gradual increase of radiation intensity.

**Conclusion.** In this paper, the rutting test was used to study and analyze the effect of UV radiation aging on the high-temperature performance of asphalt concrete, and systematically analyzed the changes in dynamic stability and rut depth of asphalt concrete with the changes in the intensity of UV aging radiation, the temperature of the UV aging cycle, and the number of cycles, and the following conclusions were drawn:

1. Under the condition of keeping the intensity of UV radiation and the cycle temperature unchanged, and increasing the number of cycles of UV aging, the rut depth of asphalt concrete increases with the increase in the number of cycles of UV aging, while the dynamic stability is a consequent decrease.

2. Experimental results show that when the intensity of UV radiation increases gradually, its effect on the rutting depth of asphalt concrete is gradually reduced.

3. The dynamic stability of asphalt concrete is related to the intensity of UV radiation, and the dynamic stability tends to decrease with the gradual increase of radiation intensity.

4. For asphalt concrete, the number of UV aging cycles has a more pronounced effect on dynamic stability and rut depth compared to aging temperature and UV radiation intensity.

## **References**

1. Y. Li et al., "Gradient aging behaviors of asphalt aged by ultraviolet lights with various intensities," *Constr. Build. Mater.*, vol. 295, p. 123618, 2021.
2. Z. Chen, H. Zhang, and H. Duan, "Investigation of ultraviolet radiation aging gradient in asphalt binder," *Constr. Build. Mater.*, vol. 246, p. 118501, 2020.
3. M. M. Xiao and L. Fan, "Ultraviolet aging mechanism of asphalt molecular based on microscopic simulation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 319, p. 126157, 2022.
4. Y. Li et al., "Aging effects of ultraviolet lights with same dominant wavelength and different wavelength ranges on a hydrocarbon-based polymer (asphalt)," *Polym. Test.*, vol. 75, pp. 64–75, 2019.
5. W. Zeng et al., "Research on Ultra Violet (UV) aging depth of asphalts," *Constr. Build. Mater.*, vol. 160, pp. 620–627, 2018.
6. Y. T. Wu, "Low-temperature rheological behavior of ultraviolet irradiation aged matrix asphalt and rubber asphalt binders," *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 708–717, 2017.
7. H. Yu et al., "Impact of ultraviolet radiation on the aging properties of SBS-modified asphalt binders," *Polymers*, vol. 11, no. 7, p. 1111, 2019.
8. Y. Li et al., "Aging degradation of asphalt binder by narrow-band UV radiations with a range of dominant wavelengths," *Constr. Build. Mater.*, vol. 220, pp. 637–650, 2019.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОБАВОК КАТІОННОГО ЛАТЕКСУ  
BUTONAL NS 198 І БАЗАЛЬТОВОЇ ФІБРИ НА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ  
МАТЕРІАЛУ ЗІ ЩЕБЕНЕВО-ПІЩАНИХ СУМІШЕЙ ІЗ  
ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ, УКРІПЛЕНИХ ЦЕМЕНТОМ**

**STUDY OF THE EFFECT OF ADDITIVES OF CATIONIC LATEX  
BUTONAL NS 198 AND BASALT FIBER ON THE FROST  
RESISTANCE OF CRUSHED STONE AND SAND MIXTURES OF  
IRON TAILINGS REINFORCED WITH CEMENT**

**Сунь Цзянь, аспірант, Жданюк В.К., д.т.н., проф. (Харківський  
національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків)**

**Jian Sun, PhD student, Zhdaniuk V.K., Doctor of Engineering,  
Professor, (Kharkiv National Automobile and Highway University,  
Kharkiv)**

*Досліджено вплив добавок катіонного латексу Butonal NS 198 і базальтової фібри на показники міцності і морозостійкості матеріалу з щебенєво-піщаної суміші СЩ 40 із залізистих кварцитів, укріплених цементом. Експериментально встановлено зростання значень коефіцієнта залишкової міцності матеріалу з щебенєво-піщаної суміші модифікованої одночасно фіброю та латексом.*

*One of the directions that contributes to increasing the durability of road construction materials in road surface layers of highways is to increase their frost resistance. During freezing of a material made of crushed stone-sand-cement mixtures, saturated with water, its destruction occurs due to the anomaly of water known from physics. Research has established that in order to obtain a cement-containing material with high frost resistance, it must be prepared with the minimum necessary amount of water, compacted to the maximum density, harden under favorable conditions and contain the optimal volume of pores. Today, the influence of various factors on the frost resistance of materials made of gravel-sand mixtures reinforced with cement remains insufficiently studied, compared to such road construction materials as cement and asphalt concrete. In addition, the impact of the genesis of stone material in crushed stone-sand mixtures reinforced with cement on the resistance of the material in the road wear layer to cyclic freezing and thawing remains insufficiently studied. The purpose of this work is to study the effect of Butonal NS 198 cationic latex additives and basalt fiber on the strength and frost resistance indicators of crushed stone-sand mixtures made of ferruginous quartzite reinforced with cement.*

*According to the results of the research, it was established that the material made of crushed stone-sand mixtures of SSh 40 made of ferruginous quartzite with 4% cement shows a tendency towards a moderate increase in the values of the compressive strength limit and the ultimate splitting strength along the original in case of adding 0.5% basalt*

fiber to its composition, as an individual modifying additive. In the case of simultaneous addition of 0.5% basalt fiber and different amounts of cationic latex, a similar pattern is observed. This indicates that the compressive strength and splitting strength indicators are not sufficiently sensitive as criteria for evaluating the effectiveness of the investigated fiber and latex additives at the concentrations adopted in the work. The results of the study of the frost resistance of the material made of crushed stone-sand mixtures reinforced with cement without fiber and latex additives show that the value of its compressive strength limit is 3.2 MPa, and after 10 freeze-thaw cycles it decreased to 1.9 MPa, which is 41% and is essential. This indicates insufficient frost resistance of the material from the crushed stone-sand mixture reinforced with 4% cement. In the case of adding basalt fiber and cationic latex to the composition of the material from crushed stone-sand mixtures reinforced with cement, the values of the residual strength coefficients after 10 freeze-thaw cycles increase significantly. This testifies to the positive effect of fiber and latex additives on increasing the resistance of the material structure to cyclic freezing and thawing, that is, on increasing the frost resistance of the complexly modified material.

*Ключові слова:* Катіонний латекс, базальтова фібра, щебенево-піщана суміш, залізистий кварцит, цемент, міцність, морозостійкість

*Keywords:* Cationic latex, basalt fibers, crushed stone and sand mixture, iron tailings, cement, strength, frost resistance

## **Вступ**

Досвід використання в дорожньому будівництві щебенево-піщаних сумішей (ЩПС) укріплених цементом свідчить про підвищену міцність і довговічність влаштованих шарів дорожніх одягів автомобільних доріг, порівняно з шарами побудованими з не укріплених цементом щебенево-піщаних сумішей. Більша довговічність таких матеріалів в шарах дорожнього одягу за критерієм міцності забезпечується їхньою кристалізаційною структурою.

Одним із напрямків, що сприяє збільшенню довговічності дорожньо-будівельних матеріалів в шарах дорожнього одягу автомобільних доріг, є підвищення їхньої морозостійкості. При заморожуванні матеріалу з щебенево-піщано-цементних сумішей, насиченого водою, його руйнування відбувається внаслідок відомої з фізики аномалії води. Вода, що знаходиться в порах матеріалу, замерзає в них і, розширюючись, викликає появу надлишкового внутрішнього тиск на стінки пор. Тиск може створювати граничні розтягуючі напруження в стінках пір і призводити до істотних змін структури укріплених мінеральними в'язучими кам'яних матеріалів, що позначається на зниженні їхніх міцнісних властивостей. Дослідженнями встановлено [1], що для



отримання цементовміщуючого матеріалу високої морозостійкості він має бути приготовлений з мінімально необхідною кількістю води, ущільнений до максимальної густини, тверднути у сприятливих умовах та містити оптимальний об'єм пор. На сьогодні вплив різних чинників на морозостійкість матеріалів з щебенево-піщаних сумішей, укріплених цементом, залишається недостатньо дослідженим, порівняно з такими дорожньо-будівельними матеріалами як цементний та асфальтовий бетони. Окрім того, недостатньо дослідженим залишається вплив генезису кам'яного матеріалу в щебенево-піщаних сумішах, укріплених цементом, на стійкість матеріалу в шарі дорожнього одягу до циклічного заморожування-відтавання. Ця обставина ускладнює вибір ЩПС з тієї чи іншої гірської породи для укріплення цементом в різних кліматичних умовах експлуатації дорожніх одягів. На сьогодні недостатня вивченість властивостей матеріалів з укріплених цементом ЩПС із залізистих кварцитів, порівняно з гранітними [2,3], стримує більш широке їхнє застосування в дорожньому будівництві.

Метою даної роботи є дослідження впливу добавок катіонного латексу Butonal NS 198 і базальтової фібри на показники міцності і морозостійкості щебенево-піщаних сумішей із залізистих кварцитів, укріплених цементом.

## **Матеріали та методи випробувань**

### **Матеріали**

Для досліджень була прийнята щебенево-піщана суміш із залізистих кварцитів СЩ 40 з максимальним розміром зерен щебеню 40 мм, яка за властивостями відповідала вимогам [4]. Гранулометричний склад прийнятої для досліджень щебенево-піщаної суміші наведений на рис. 1. Як мінеральний в'язучий матеріал в процесі досліджень використовували силікатний цемент марки М400 виробництва Сінцзянського цементного заводу Qingsong, технічні характеристики якого наведено в таблиці 1. Як модифікуючу добавку до щебенево-піщаної суміші, укріпленої цементом, використовували водний катіонний латекс серії Butonal NS 198 виробництва компанії BASF (Німеччина), технічні характеристики якого наведені в таблиці 2. Базальтову фібру довжиною волокон 18 мм виробництва компанії Zhejiang Haining Anjie Composites Company використовували як армуючу добавку до щебенево-піщаної суміші з

цементом та катіонним латексом. Технічні характеристики базальтової фібри наведені в таблиці 3.

Таблиця 1

## Фізико-механічні властивості цементу

Властивості	Час схоплювання (хв.)		Міцність за стиску (МПа)		Міцність за вигину (МПа)	
	Час початкового схоплювання	Час остаточного схоплювання	3дні	28днів	3дні	28днів
Вимірне значення	176	213	26.3	49.3	4.3	6.9

Таблиця 2

## Властивості катіонного латексу

Назва латексу	Зовнішній вигляд	Вміст твердої речовини (%)	РН	В'язкість (мПа·с)	Питома вага (г/см <sup>3</sup> )	Температура склування Tg(DSC) (°C)
Butonal NS 198	Водна дисперсія білого кольору	64	5,3	300	0.96	-53

Таблиця 3

## Властивості базальтової фібри

Щільність (г/см <sup>3</sup> )	Діаметр волокна(μm)	Міцність на розрив (МПа)	Модуль пружності (Гра)	Подовження при розриві (%)	Стійкий до лугів, рівень збереження міцності на розрив (%)
2.65	18±2	3500	100	3.8	92.3

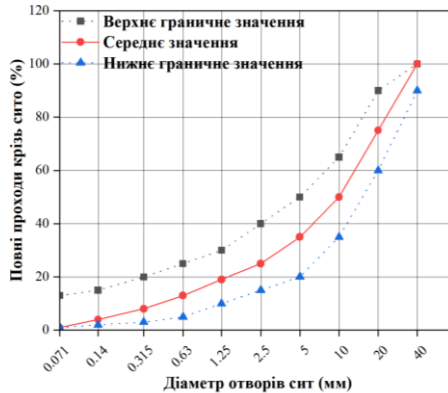


Рис. 1 Гранулометричний склад щебенево-піщаної суміші СЩ-40

### Методи випробувань

Для проведення досліджень виготовляли щебенево-піщану суміш із залізистих кварцитів укріплену 4% цементу за оптимальної вологості з якої формували циліндричні зразки методом статичного ущільнення протягом 3 хвилин за тиску 160 кН. Також формували зразки з виготовлених щебенево-піщаних сумішей із залізистих кварцитів з 4 % цементу до складу яких додавали різну кількість катіонного латексу Butonal NS 198 від маси води і 0,05 % базальтової фібри від маси мінеральної частини для визначення ефективності їхнього впливу на показники міцності і морозостійкості. Твердіння відформованих циліндричних зразків розміром  $100 \times 100$  мм відбувалося протягом 28 діб у стандартних умовах за температури  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  і вологості 95 %. Після завершення терміну твердіння зразки занурювали у воду на 48 годин. Для дослідження морозостійкості водонасичені зразки піддавали циклам заморожування-відтавання. У кожному циклі заморожування-відтавання час заморожування у морозильній камері за температури  $-20^\circ\text{C}$  становив 20 год, а час відтавання у воді за температури  $+20^\circ\text{C}$  - 4 год. Морозостійкість зразків з щебенево-піщаних сумішей із залізистих кварцитів, укріплених цементом, з добавками катіонного латексу Butonal NS 198 і базальтової фібри оцінювали за зміною величин границі міцності за одноосьового стиску і границі міцності за расколювання по твірній після 10 циклів заморожування-відтавання.

### Результати та обговорення

Результати дослідження впливу різної концентрації катіонного латексу Butonal NS 198 і 0,05 % базальтової фібри на міцнісні показники та

коефіцієнти залишкової міцності матеріалу з щебенево-піщаних сумішей СЩ-40 із залістистих кварцитів, укріплених цементом, після 10 циклів заморожування-відтавання представлені на рис. 2 і рис. 3. Коефіцієнт залишкової міцності визначали як відношення границі міцності матеріалу після впливу на нього 10 циклів заморожування-відтавання до границі міцності матеріалу яку він мав до впливу на нього циклів заморожування-відтавання. Зміна зовнішнього вигляду зразків після 5 та 10 циклів заморожування-відтавання наведено на рис. 4.

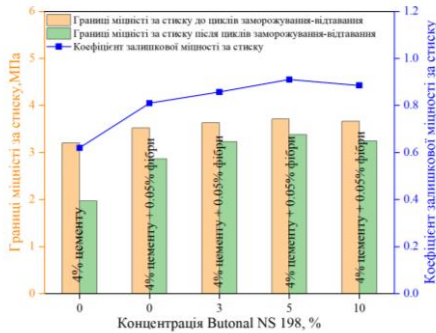


Рис. 2 Залежність границі міцності за стиску і коефіцієнта залишкової міцності за стиску зразків матеріалу з щебенево-піщаних сумішей СЩ-40 із залістистих кварцитів, укріплених цементом, з 0,05 % базальтової фібри від концентрації латексу Butonal NS 198

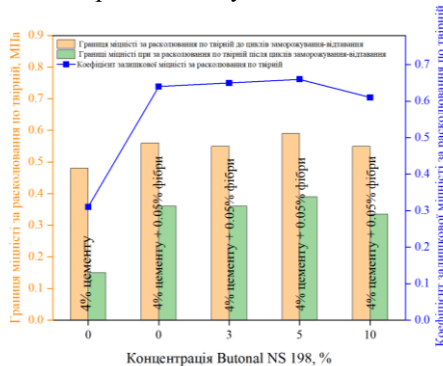


Рис. 3 Залежність границі міцності за розколювання по твірній і коефіцієнта залишкової міцності за розколювання по твірній зразків матеріалу з щебенево-піщаних сумішей СЩ-40 із залістистих кварцитів, укріплених цементом, з 0,05 % базальтової фібри від концентрації латексу Butonal NS 198



0 циклів      5 циклів      10 циклів

(а) СЦ 40 + 4 % цементу



0 циклів      5 циклів      10 циклів

(б) СЦ 40 + 4 % цементу + 3 % Butonal NS 198 + 0,05 % базальтової фібри



0 циклів      5 циклів      10 циклів

(в) СЦ 40 + 4 % цементу + 5 % Butonal NS 198 + 0,05 % базальтової фібри



0 циклів      5 циклів      10 циклів

(г) СЦ 40 + 4 % цементу + 10 % Butonal NS 198 + 0,05 % базальтової фібри

Рис. 4 Загальний зовнішній вигляд зразків до та після циклів заморозування-відтавання

Із наведених на рис. 2 і 3 результатів досліджень видно, що додавання 0,05 % базальтової фібри до складу укріплених 4 % цементу щебенево-піщаних сумішей призводить до незначного збільшення значень границі міцності за стиску (на 9 %) і дещо більшого зростання границі міцності за розколювання по твірній (на 14 %). Також видно, що вплив циклів заморожування-відтавання призводить до зменшення значень границі міцності за стиску і границі міцності за розколювання по твірній всіх досліджуваних матеріалів. Найбільше зниження показників міцності і коефіцієнта залишкової міцності після 10 циклів заморожування-відтавання властиве матеріалу з щебенево-піщаних сумішей із залістистих кварцитів, укріплених цементом, до складу якого не додавали фібру і латекс. У випадку одночасного додавання до складу досліджуваного матеріалу базальтової фібри і катіонного латексу спостерігається зростання значень коефіцієнтів запасу міцності за стиску і за розколювання по твірній, порівняно з матеріалом без вказаних складників. Найбільше зростання значень коефіцієнта залишкової міцності за стиску і коефіцієнта залишкової міцності за расколювання по твірній (збільшилися на 29 % і 35 % відповідно) властиве матеріалу до складу якого входить 4 % цементу, 5 % катіонного латексу від маси води та 0,05 % базальтової фібри від маси мінеральної частини, порівняно з матеріалом з щебенево-піщаної суміші СЩ-40 із залістистих кварцитів укріплених 4 % цементу без латексу і базальтової фібри. Із наведених на рис. 4 результатів досліджень видно, що після 5 та 10 циклів заморожування-відтавання зразкам матеріалу з щебенево-піщаної суміші СЩ-40 із залістистих кварцитів укріплених 4 % цементу з катіонним латексом і базальтовою фіброю характерна менша пошкоджуваність їхньої поверхні, порівняно з СЩ-40 із залістистих кварцитів укріплених 4 % цементу без латексу і базальтової фібри. Експериментально встановлено, що втрата маси зразками матеріалу після 10 циклів заморожування-відтавання зменшується зі збільшення вмісту катіонного латексу у його складі.

## **Висновки**

За результатами досліджень встановлено, що матеріал з щебенево-піщаних сумішей СЩ 40 із залістистих кварцитів з 4 % цементу демонструє тенденцію до помірного зростання значень границі міцності за стиску і границі міцності за розколювання по твірній у разі додавання до його складу 0,5 % базальтової фібри, як індивідуальної модифікуючої добавки. У разі одночасного додавання 0,5 % базальтової фібри та різної кількості катіонного латексу спостерігається аналогічна закономірність. Це свідчить про те, що показники границі міцності за стиску і границі міцності за розколювання по твірній є недостатньо чутливими як критерії оцінки

ефективності впливу досліджуваних добавок фібри та латексу за прийнятих в роботі концентрацій.

Результати дослідження морозостійкості матеріалу з щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом без добавок фібри та латексу показують, що значення його границі міцності за стиску становить 3,2 МПа, а після 10 циклів заморожування-відтавання зменшилося до 1,9 МПа, що складає 41 % і є суттєвим. Це вказує на недостатню морозостійкість матеріалу з щебенево-піщаної суміші, укріпленої 4 % цементу. У випадку додавання базальтової фібри і катіонного латексу до складу матеріалу з щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом значення коефіцієнтів залишкової міцності після 10 циклів заморожування-відтавання суттєво зростають. Це свідчить про позитивний вплив добавок фібри і латексу на підвищення стійкості структури матеріалу до циклічного заморожування-відтавання, тобто на зростання морозостійкості комплексно модифікованого матеріалу.

### **References**

1. Berh O.Ia. Vysokomitsnyi beton. M: Transport, 1971.-189s.
2. Zhdaniuk V.K., Kostin D.Iu., Arinushkina O.O., Pavliutin K.O. Doslidzhennia mitsnosti shchebenevo-pishchanykh sumishei, ukriplenykh portlandtsementom // Materialy vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Suchasni tekhnologii budivnytstva u ekspluatatsii avtomobilnykh dorih» Kharkiv: KhNADU, 2016. S. 53-57.
3. Zhdaniuk V.K., Kostin D.Iu., Arinushkina O.O. Doslidzhennia vplyvu kombinovanykh v'язhuchykh na vlastyvoli shchebenevo-pishchanykh sumishei // Mizhnarodnyi zbirnyk (za haluziamy znan «Mashynobuduvannia ta metaloobrobka», «Inzhenerna mekhanika», Metalurhiia ta metaloznavstvo») Lutsk: LNTU, 2016. Vyp. 46. 7 s.
4. HBN V.2.3-37641918-554:2013 Avtomobilni dorohy. Shary dorozhnogo odiahu z kamianykh materialiv, vidkhodiv promyslovosti i hruntiv, ukriplenykh tsementom. Proiektuvannia ta budivnytstvo.

### **Література**

1. Берг О.Я. Високоміцний бетон. М: Транспорт, 1971.-189с.
2. Жданюк В.К., Костін Д.Ю., Арінушкіна О.О., Павлютін К.О. Дослідження міцності щебенево-піщаних сумішей, укріплених поргландцементом // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні технології будівництва й експлуатації автомобільних доріг» Харків: ХНАДУ, 2016. С. 53-57.
3. Жданюк В.К., Костін Д.Ю., Арінушкіна О.О. Дослідження впливу комбінованих в'язучих на властивості щебенево-піщаних сумішей // Міжнародний збірник (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», Металургія та металознавство») Луцьк: ЛНТУ, 2016. Вип. 46. 7 с.
4. ГБН В.2.3-37641918-554:2013 Автомобільні дороги. Шари дорожнього одягу з кам'яних матеріалів, відходів промисловості і ґрунтів, укріплених цементом. Проектування та будівництво.

## ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ В МІСТАХ: ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

### REMOTE SENSING MONITORING OF THERMAL CONDITIONS IN CITIES: THEORETICAL BACKGROUND

Уль А.В., д.т.н., проф. (Волинський національний університет ім. Лесі Українки), Мельник О.В., к.т.н., доц. (Волинський національний університет ім. Лесі Українки), Мельник Ю.А., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет), Вакулюк Л.А., старший викладач (Волинський національний університет ім. Лесі Українки) Резь Р.А., аспірант (Волинський національний університет ім. Лесі Українки)

Uhl A.V., Dr.Tech in Engineering, Professor (Lesya Ukrainka Volyn National University), Melnyk O.V., PhD in Engineering, associate professor (Lesya Ukrainka Volyn National University), Melnyk Y.A., PhD in Engineering, associate professor (Lutsk National Technical University), Vakulyuk L.A., Senior Lecturer (Lesya Ukrainka Volyn National University), Rez R.A., PhD student (Lesya Ukrainka Volyn National University)

*Феномен, відомий як міський тепловий острів, спостерігається у містах по всьому світу з 1800-х років. Метеорологічні служби в різних країнах систематично фіксують температуру повітря в різних точках. Однак ускладнене просторове розташування поверхонь у міських районах утруднює або навіть унеможливує оцінку локальних змін температури поверхні лише на підставі цих даних. Для таких оцінок використовуються супутникові знімки для визначення температури поверхні землі. Дані дистанційного термального інфрачервоного сенсора дозволяють здійснювати аналіз температури поверхні землі як у просторовому, так і у часовому вимірах, навіть на глобальному рівні. Оскільки випромінювальна здатність та атмосферні ефекти є ключовими факторами, багато дослідників розробили різноманітні методики з урахуванням цих факторів. В цій роботі розглянуто три алгоритми визначення температури земної поверхні (LST) - алгоритм одного вікна, одноканальний алгоритм та метод рівняння переносу випромінювання, а також три моделі на основі NDVI - модель Ван де Греїнд та Ове, модель Валор та Каселлес, а також модель на основі порогового значення NDVI*

*A phenomenon known as the Urban Heat Island (UHI) has been observed in cities around the world since the 1800s. Meteorological services in different countries systematically record air temperatures at different locations. However, the complicated*



*spatial arrangement of surfaces in urban areas makes it difficult or even impossible to estimate local changes in surface temperature based on these data alone. For such assessments, satellite images are used to determine the Land Surface Temperature (LST). This indicator is a key factor that affects air temperature and is also used to create maps of the spatial distribution of temperature characteristics of the earth's surface. Remote thermal infrared sensor data allows for the analysis of the earth's surface temperature in both spatial and temporal dimensions, even at the global level. The accuracy of the determination depends on atmospheric effects, sensor parameters such as spectral range and viewing angle, as well as surface parameters such as emissivity and geometry. Since emissivity and atmospheric effects are key factors, many researchers have developed various techniques to account for these factors. In this paper, three algorithms for determining the land surface temperature (LST) - the single window algorithm, the single channel algorithm, and the radiation transfer equation method - as well as three NDVI-based models - the Van de Groen and Ouwe model, the Valor and Caselles model, and the NDVI threshold model - are reviewed.*

*The use of remote sensing data on land surface temperature (LST) and land surface emissivity (LSE) in the study of urbanized areas has a wide range of applications. LST measurements allow for determining the thermal regimes of different city districts, which can be useful in the development of master plans and urban design. LST data helps to identify and study urban thermal inversions depending on the types of buildings and the presence of green areas, which is important for analyzing the microclimate and air quality in cities.*

*The LST study can serve as a basis for determining thermal comfort and identifying areas where measures to improve the urban environment should be implemented. Monitoring changes in LST allows us to study the development of urbanized areas and their impact on the environment.*

*Ключові слова: урбанізовані території, дистанційне зондування, термальні інфрачервоні зображення, Landsat, міський тепловий острів, температура земної поверхні*

*Keywords: urbanized areas, remote sensing, thermal infrared images, Landsat, urban heat island, land surface temperature*

**Вступ.** Глобальне міське населення зросло з 30 % у 1950 році до 55 % у 2018 році і, за прогнозами, становитиме 68 % до 2050 року [1]. Урбанізація робить непропорційно великий внесок у глобальну зміну клімату: у 1990-х роках ~97 % антропогенних викидів CO<sub>2</sub> припадало на ~2 % загальної площі суші [2]. Очікується, що екстремальні теплові явища (теплові хвилі) будуть частішати і ставати дедалі сильнішими з глобальним потеплінням і становитимуть загрозу для здоров'я людей в усьому світі через зростання смертності та захворюваності. Заборона утилізації призводить до зміни мікроклімату, що може посилити наслідки глобального потепління. Відповідні дослідження на цю тему зосереджені в середніх широтах, тоді як вищі широти - вище 45° - недостатньо представлені та вразливі [3]. У прохолодних високих широтах забудоване

середовище часто планується і проектується таким чином, щоб зменшити втрати тепла та споживання енергії в зимові місяці. Міста з відносно прохолодними максимальними літніми температурами мають значно нижчий температурний поріг смертності, пов'язаної з теплом [4]. Це може призвести до збільшення використання енергії для охолодження, що призведе до подальшого збільшення викидів CO<sub>2</sub> і сприятиме глобальному потеплінню. Міська рослинність має потенціал для зниження температури повітря і, таким чином, споживання енергії для охолодження [5].

Міські території характеризуються зменшенням рослинного покриву і збільшенням непроникних поверхонь - тротуарів, доріг і будівель - у порівнянні з сільською місцевістю, що часто призводить до того, що в місті тепліше, ніж у навколишній сільській місцевості. Це явище, відоме як міський тепловий острів (Urban Heat Island (UHI)), спостерігається в містах по всьому світу з 1800-х років. Метеорологічні служби в багатьох країнах регулярно вимірюють температуру повітря в окремих точках. Однак складне просторове розташування поверхонь у міських районах ускладнює або навіть унеможливує оцінку локальних варіацій температури поверхні на основі лише цих даних. Супутникові знімки використовуються для оцінки температури поверхні землі (Land Surface Temperature (LST)), яка є основним фактором, що впливає на температуру повітря, а також для картографування просторового розподілу температури поверхні землі [6]. Температура повітря може бути вищою або нижчою за температуру поверхні в залежності від різних факторів, таких як наявність і напрямок вітру, інсоляція та характеристики поверхні [7]. Тим не менш, дані дистанційного зондування можуть забезпечити оцінку просторового розподілу температури на великих площах.

### **Постановка завдання**

Температура земної поверхні (LST) є одним з ключових параметрів, що впливають на енергетичний баланс з ключових параметрів, що впливають на баланс поверхневої енергії, регіональні кліматичні умови, теплові потоки та енергообмін. [7–9]. Багато дослідників вивчали важливість та вплив довготривалого сонячного випромінювання на різні включаючи міський клімат і дослідження поверхневих теплових островів (Surface Heat Island (SHI) [10, 11], евапотранспірацію [12], моніторинг лісових пожеж [13], геологічні та геотермальні дослідження [12, 13]. Крім того, LST було затверджено як один з пріоритетних параметрів Міжнародної програми з геосфери та біосфери (IGBP)[14, 15]. Дані дистанційного термального інфрачервоного зондування (Thermal Infrared (TIR)) дозволяють проводити часовий і просторовий аналіз LST у великому масштабі, навіть на глобальному рівні. Точне визначення LST з даних TIR залежить від атмосферних ефектів, параметрів датчика, тобто спектрального діапазону і кута огляду, та параметрів поверхні, таких як

випромінювальна здатність і геометрія [8]. Оскільки випромінювальна здатність і атмосферні ефекти є двома фундаментальними факторами для отримання LST з термальних даних, багато дослідників запропонували різні підходи для отримання LST з урахуванням цих факторів [16, 17]. Ці алгоритми називаються залежно від кількості використовуваних смуг сенсорів. Наприклад, одноканальні алгоритми використовують одну смугу TIR. Однак, методи з розділеним вікном або багатоканальні включають більше однієї смуги TIR.

Метою даної роботи є аналіз найпоширеніших методи визначення LST та LSE, що застосовуються до даних дистанційного зондування з КА серії Landsat.

### **Виклад основного матеріалу**

Супутники серії Landsat безперервно надають дані дистанційного зондування Землі з середньою роздільною здатністю вже понад чотири десятиліття. Починаючи з 23 липня 1972 року, загалом було запущено вісім серій супутників Landsat для цілей дистанційного зондування Землі. Landsat 6 був єдиним супутником, який не зміг досягти орбіти. Решта супутників забезпечили унікальний ресурс для дослідження глобальних змін і застосування в сільському господарстві, картографії, геології, лісовому господарстві, регіональному плануванні, моніторингу протягом останніх чотирьох десятиліть.

Landsat 5 TM і Landsat 7 ETM+ мають шість діапазонів відображення (видимий, ближній інфрачервоний, і короткохвильовий інфрачервоний, просторова роздільна здатність 30 м) і один діапазон в області TIR (смуга 6). Тепловий діапазон має власну просторову роздільну здатність 120 м та 60 м для сенсорів TM та ETM+, відповідно, але він надається кінцевим споживачам з роздільною здатністю 30 м після передискретизації кубічною згорткою. Датчик OLI Landsat 8 має дев'ять смуг відбиття з просторовою роздільною здатністю 30 м, а датчик Landsat 8 TIRS має дві смуги в TIR (смуга 10 і смуга 11). Ці теплові смуги мають власну просторову роздільну здатність 100 м, але передискретизуються і публікуються з роздільною здатністю 30 м Геологічною службою США.

Алгоритм одного вікна [18], Одноканальний алгоритм [19], Метод рівняння переносу випромінювання та алгоритм розділеного вікна [17, 18] є одними із найшороковживаніших алгоритмів визначення температури поверхні землі (LST) із вищезгаданих даних дистанційного зондування Землі. У той час як перші три методи можуть бути застосовані до даних Landsat 5 TM, 7 ETM+ та 8 OLI/TIRS, алгоритм розділеного вікна може бути застосований лише до даних Landsat 8 OLI/TIRS, оскільки для цього потрібно щонайменше два діапазони TIR. Істотні відмінності між цими методами полягають у математичному формулюванні та вхідних параметрах [20]. На додаток до випромінювальної здатності та

пропускання атмосфери, які є спільними для всіх методів, алгоритм одного вікна потребує приземної температури повітря для розрахунку ефективної середньої температури атмосфери, на відміну від інших методів. І навпаки, метод рівняння переносу випромінювання та одноканальний алгоритм потребують висхідного та низхідного атмосферного випромінювання для знаходження LST.

### Алгоритм одного вікна

Алгоритм одного вікна (Mono Window Algorithm, MWA) був розроблений Цинь та ін. [43] для даних Landsat TM. Метод потребує трьох основних параметрів, а саме: випромінювальної здатності, коефіцієнта пропускання атмосфери та ефективної середньої температури атмосфери. Значення LST за алгоритмом одного вікна можна визначити як:

$$T_s = \frac{\{a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D]T - DT_a\}}{C}, \quad (1)$$

$$a = -67.355351,$$

$$b = 0.458606$$

$$C = \varepsilon \times \tau,$$

$$D = (1 - \tau)[1 + (1 - \varepsilon)\tau],$$

де  $T_s$  - температура земної поверхні в Кельвінах,  $T$  - температура яскравості на датчику в Кельвінах,  $T_a$  - ефективна середня температура атмосфери в Кельвінах,  $\tau$  - коефіцієнт пропускання атмосфери,  $\varepsilon$  - випромінювальна здатність земної поверхні (Land Surface Emissivity (LSE)),  $a$  і  $b$  - константи алгоритму,  $C$  і  $D$  - параметри алгоритму, обчислені з використанням LSE і коефіцієнт пропускання.

### Одноканальний алгоритм

У роботі [19] було представлено перегляд алгоритму одного вікна для отримання LST з даних Landsat TIR. Враховуючи алгоритм одного вікна, LST ( $T_s$ ) можна обчислити, використовуючи наступне загальне рівняння:

$$T_s = \gamma \left[ \frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta, \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  - випромінювальна здатність земної поверхні (LSE),  $L_{sen}$  - випромінювання на сенсорі в тепловому діапазоні,  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  - атмосферні функції, а  $\gamma, \delta$  - два параметри, що задаються:

$$\gamma \approx \frac{T^2}{b_\gamma L_{сен}}$$

$$\delta \approx T - \frac{T^2}{b_\gamma}$$

де  $b_\gamma = \frac{c_2}{\lambda}$ ,  $c_2 = 14387,7 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ , а  $\lambda_i$  - ефективна довжина хвилі для смуги  $i$ , яка визначається як:

$$\lambda_i = \frac{\int_{\lambda_{1,i}}^{\lambda_{2,i}} \lambda f_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{1,i}}^{\lambda_{2,i}} f_i(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

де  $f_i(\lambda)$  - функція спектрального відгуку для відповідної смуги.  $\lambda_{1,i}$  та  $\lambda_{2,i}$ , - нижня та верхня границя  $f_i(\lambda)$ , відповідно. Значення  $b_\gamma$  дорівнює 1256 К і 1277 К для смуги 6 знімків Landsat 5 і Landsat 7, відповідно; для смуги 10 і смуги 11 Landsat 8 воно дорівнює 1320 К і 1199 К відповідно. Атмосферні функції  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  та  $\psi_3$  визначаються як:

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}; \psi_2 = -L_\lambda^\downarrow - \frac{L_\lambda^\uparrow}{\tau}; \psi_3 = L_\lambda^\downarrow$$

де  $L_\lambda^\uparrow (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$  - висхідне випромінювання або випромінювання атмосферного шляху,  $L_\lambda^\downarrow (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$  низхідне випромінювання або випромінювання неба.

Метод рівняння переносу випромінювання  
 Простим методом отримання LST з однієї смуги TIR є інверсія рівняння радіаційного переносу випромінювання (RTE) відповідно до наступних виразів:

$$L_\lambda^{sen} = \left[ \varepsilon B_\lambda(T_s) + (1 - \varepsilon) L_\lambda^\downarrow \right] \tau + L_\lambda^\uparrow \quad (4)$$

де  $L_\lambda^{sen} (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$  - зареєстроване на сенсорі випромінювання відповідного теплового діапазону,  $B_\lambda(T_s) = (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$  - випромінювання чорного тіла. Випромінювання чорного тіла ( $B_\lambda$ ) при температурі  $T_s$  можна отримати, з рівняння (4):

$$B_{\lambda}(T_s) = \frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{\uparrow}}{\tau\varepsilon} \quad (5)$$

Звідси вже можна отримати  $T_s$ , використовуючи закон Планка як:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left( \frac{K_1}{\frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau(1 - \tau)L_{\lambda}^{\uparrow}}{\tau\varepsilon}} \right)} \quad (6)$$

де  $K_1$  та  $K_2$  - калібрувальні константи для даних Landsat.

### Алгоритм розділеного вікна

У попередніх дослідженнях було представлено різні алгоритми розділеного вікна (Split Window Algorithms (SWA) для різних датчиків [21–23], а детальна інформація про SWA наведена в [24]. В цій роботі ми розглядаємо алгоритми розділеного вікна, розроблений в роботі [25] з коефіцієнтами перепараметризованими у [17], що відповідають кривій спектрального відбиття Landsat 8 TIRS.

Геологічна служба США рекомендувала не використовувати смугу 11 Landsat 8 для отримання LST через велику калібрувальну невизначеність [26]. Однак деякі дослідники стверджують, що вони отримали задовільні результати за допомогою алгоритми розділеного вікна [17, 27]. Тому в цьому дослідженні ми також аналізуємо алгоритм розділеного вікна. Згідно з алгоритмом розділеного вікна, LST ( $T_s$ ) можна обчислити за допомогою наступного рівняння:

$$T_s = T_{10} + B_1(T_{10} - T_{11}) + B_0, \quad (7)$$

$$\text{де } B_0 = \frac{C_{11}(1 - A_{10} - C_{10})L_{10} - C_{10}(1 - A_{11} - C_{11})L_{11}}{C_{11}A_{10} - C_{10}A_{11}},$$

$$B_1 = \frac{C_{10}}{C_{11}A_{10} - C_{10}A_{11}},$$

$$A_{10} = \varepsilon_{10}\tau_{10},$$

$$A_{11} = \varepsilon_{11}\tau_{11},$$

$$C_{10} = (1 - \tau_{10})(1 + (1 - \varepsilon_{10})\tau_{10}), \quad C_{11} = (1 - \tau_{11})(1 + (1 - \varepsilon_{11})\tau_{11}).$$

Тут  $\varepsilon_{10}$  та  $\varepsilon_{11}$  - LSE для смуг 10 і 11 відповідно,  $\tau_{10}$  і  $\tau_{11}$  - атмосферне пропускання атмосфери для смуг 10 і 11, відповідно.

### **Моделі випромінювальної здатності земної поверхні (LSE)**

Випромінювальна здатність земної поверхні LSE ( $\varepsilon$ ) - це здатність поверхні перетворювати теплову енергію в енергію випромінювання [28]. Випромінювальна здатність земної поверхні є одним з ключових параметрів для отримання точних даних температури земної поверхні з за допомогою даних дистанційного зондування. Напівемпіричні методи, фізично обґрунтовані методи та багатоканальні методи розділення температури/випромінювальної здатності є трьома різними категоріями для отримання LSE з космосу. Фізично обґрунтовані методи і багатоканальні методи не можуть бути застосовані до даних Landsat для отримання LSE через обмеження, наведені в багатьох дослідженнях, такі як вимога більш ніж двох TIR-діапазонів або нічних знімків. Напівемпіричні методи визначення випромінювальної здатності земної поверхні містять метод випромінювальної здатності на основі класифікації [21] та метод оцінки випромінювання на основі нормалізованого диференційного індексу рослинності NDVI [29], які підходять для оцінки LSE за даними Landsat. Метод випромінювальної здатності на основі класифікації генерує зображення LSE з класифікованого зображення шляхом застосування значення випромінювальної здатності для кожного класу. Однак, метод випромінювальної здатності на основі класифікації не є практичним, оскільки вимагає хорошого знання досліджуваної території та вимірювань випромінювальної здатності на поверхнях, репрезентативних для різних класів. Методи на основі NDVI є оперативними і найбільш часто використовуваними методами пошуку LSE, оскільки вони прості у застосуванні і дають задовільні результати [28].

### **Модель Ван де Грінд та Ове**

Ця модель була застосована до методів пошуку LST всіх серій Landsat (Landsat 5 TM, 7 ETM+, та 8 OLI/TIRS). В роботі [30] було запропоновано логарифмічний підхід для пошуку LSE на основі NDVI в діапазоні від 0,157 до 0,727. NDVI отримують з використанням ближнього інфрачервоного (NIR) та червоного (R) діапазонів. Запропонована модель має вигляд:

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \ln(NDVI) \quad (8)$$

### Модель Валор та Каселлес

Валор і Каселлес в роботі [29] запропонували теоретичну модель, що може бути застосована до усіх серій Landsat, яка пов'язує випромінювальну здатність з NDVI певної поверхні за допомогою коефіцієнта:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + 4 \langle d\varepsilon \rangle P_v (1 - P_v) \quad (9)$$

$\varepsilon_s$  і  $\varepsilon_v$  представляють випромінювальну здатність рослинності і ґрунту відповідно.  $\langle d\varepsilon \rangle$  - член, що враховує ефект порожнин, який залежить від геометрії поверхні.  $P_v$  (також відомий як фракційний рослинний покрив) - це частка рослинності, яка розраховується за формулою [103]:

$$P_v = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right]^2, \quad (10)$$

де  $NDVI_{\max} = 0,5$  і  $NDVI_{\min} = 0,2$  у глобальній ситуації [70]. Як запропонували Валор та Каселлес [82],  $\varepsilon_v$  та  $\varepsilon_s$  приймаються 0,985 і 0,960, відповідно. Крім того, було розраховано середнє значення для члена  $\langle d\varepsilon \rangle$  як 0,015.

### Модель LSE на основі порогового значення NDVI ( $NDVI^{THM}$ )

У роботах [31, 32] пропонується оцінювати LSE на основі NDVI порогових значень ( $NDVI^{THM}$ ), розглядаючи три різні випадки, як представлено в рівнянні (11). У першому випадку ( $NDVI < 0.2$ ) піксель розглядається як голий ґрунт, а випромінювальна здатність отримується зі значень відбиття в червоній області. У другому випадку ( $0,2 \leq NDVI \leq 0,5$ ) піксель складається з сумішшю голого ґрунту та рослинності, а в третьому випадку ( $NDVI > 0.5$ ) пікселі зі значеннями  $NDVI > 0.5$  вважаються повністю вкритими рослинністю.

$$\varepsilon = \begin{cases} a_i \rho_R + b_i & NDVI < 0.2 \\ \varepsilon_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + d\varepsilon, \quad d\varepsilon = (1 - \varepsilon_s)(1 - P_v) F_{\varepsilon_v} & 0.2 \leq NDVI \leq 0.5 \\ NDVI > 0.5 & \end{cases} \quad (11)$$

У рівнянні (11)  $\rho_R$  - це значення коефіцієнта відбиття червоної смуги,  $a_i$  та  $b_i$  оцінюються з емпіричного співвідношення між коефіцієнтом відбиття червоної смуги та зображенням спектрорадіометра з середньою роздільною здатністю та бібліотекою випромінювальної здатності.  $\varepsilon_v$  та  $\varepsilon_s$  - випромінювальна здатність ґрунту і рослинності, відповідно.  $d''$  -



ефект порожнини ефект порожнин, зумовлений шорсткістю поверхні, як і в попередній моделі ( $de = 0$  для плоских поверхонь).  $F$  - геометричний геометричний коефіцієнт форми, прийнятий за середнє значення 0,55 [20].

## Висновки

У цьому дослідженні розглянуто три алгоритми визначення температури земної поверхні (LST) - алгоритм одного вікна, одноканальний алгоритм та метод рівняння переносу випромінювання.

Оскільки випромінювальна здатність земної поверхні (LSE) є одним з найважливіших факторів, що впливають на точність методів пошуку LST, було також розглянуто різні моделі на основі NDVI. Три моделі на основі NDVI, а саме: Модель Ван де Грінд та Ове, Модель Валор та Каселлес, а також модель на основі порогового значення NDVI ( $NDVI^{THM}$ ) були розглянуті для даних Landsat 5 TM і 7 ETM+.

Теплові смуги мають власну просторову роздільну здатність 120 м, 60 м і 100 м для Landsat 5 TM, 7 ETM+ і 8 TIRS, відповідно, але вони надаються кінцевим користувачам з роздільною здатністю 30 м після передискретизації кубічною згорткою. Різні методи зменшення масштабу для даних TIR або LST можуть бути використані в подальшій роботі для дослідження точності LST.

Використання даних про температуру земної поверхні (Land Surface Temperature, LST) та випромінювання земної поверхні (Land Surface Emissivity, LSE) з дистанційного зондування в дослідженні урбанізованих територій має широкий спектр застосувань. Вимірювання LST дозволяє визначити тепловий режим різних районів міста, що може бути корисним при розробці генеральних планів та дизайну міського середовища. Дані LST допомагають виявляти та вивчати міські теплові інверсії в залежності від типів забудови та наявності зелених зон, що важливо для аналізу мікроклімату та якості повітря в містах.

Дослідження LST може служити основою для визначення теплового комфорту та ідентифікації територій, де необхідно впроваджувати заходи для поліпшення міського середовища. Слідкування за змінами LST дозволяє вивчати розвиток урбанізованих територій та їх вплив на оточуюче середовище.

В цілому, дані про температуру земної поверхні та випромінювання земної поверхні з дистанційного зондування є потужним інструментом для вивчення міських областей та урбанізованих територій, дозволяючи отримувати інформацію про тепловий режим та взаємодію міста з навколишнім середовищем.

## References

1. Adamo, S. B., Sherbinin, A. de. Population distribution, urbanization, internal migration, and development: An international perspective. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2011.

- C. 161–195.
2. Svirejeva-Hopkins, A., Schellnhuber, H. J., Pomaz, V. L. Urbanised territories as a specific component of the Global Carbon Cycle. *Ecological Modelling*. 2004. Vol. 173, No. 2–3. C. 295–312.
  3. Campbell, S., Remenyi, T. A., White, C. J., та ін. Heatwave and health impact research: A global review. *Health & place*. 2018. Vol. 53. C. 210–218.
  4. Gosling, S. N., McGregor, G. R., Páldy, A. Climate change and heat-related mortality in six cities Part I: model construction and validation. *International journal of biometeorology*. 2007. Vol. 51. C. 525–540.
  5. Akbari, H., Kurn, D. M., Bretz, S. E., та ін. Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and buildings*. 1997. Vol. 25, No. 2. C. 139–148.
  6. Voogt, J. A., Oke, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of the environment*. 2003. Vol. 86, No. 3. C. 370–384.
  7. Prihodko, L., Goward, S. N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 60, No. 3. C. 335–346.
  8. Dash, P., Göttsche, F.-M., Olesen, F.-S., та ін. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23, No. 13. C. 2563–2594.
  9. Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., та ін. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote sensing of the environment*. 2013. Vol. 131. C. 14–37.
  10. Sekertekin, A., Kutoglu, S. H., Kaya, S. Evaluation of spatio-temporal variability in Land Surface Temperature: A case study of Zonguldak, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*. 2016. Vol. 188. C. 1–15.
  11. Naughton, J., McDonald, W. Evaluating the variability of urban land surface temperatures using drone observations. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 14. C. 1722.
  12. Senay, G. B., Schauer, M., Velpuri, N. M., та ін. Long-term (1986–2015) crop water use characterization over the Upper Rio Grande Basin of the United States and Mexico using Landsat-based evapotranspiration. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 13. C. 1587.
  13. Maffei, C., Alfieri, S. M., Menenti, M. Relating spatiotemporal patterns of forest fires burned area and duration to diurnal land surface temperature anomalies. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, No. 11. C. 1777.
  14. Townshend, J. R., Justice, C. O., Skole, D., та ін. The 1 km resolution global data set: Needs of the international geosphere biosphere program! *International Journal of Remote Sensing*. 1994. Vol. 15, No. 17. C. 3417–3441.
  15. Meng, X., Cheng, J., Sensing, S. L.-R., та ін. Estimating land surface temperature from Feng Yun-3C/MERSI data using a new land surface emissivity scheme. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. C. 1247.
  16. Becker, F. Toward a local split window method over the land surface. *Int. J. Remote Sensing*. 1990. Vol. 11. C. 19–34.
  17. Yu, X., Guo, X., Sensing, Z. W.-R., та ін. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm, and single channel. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. C. 6.
  18. Qin, Z., Karnieli, A., Remote, P. B.-I. journal of, та ін. A mono-window algorithm

- for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International journal of remote sensing*. 2001. Vol. 22, No. 18. C. 3719–3746.
19. Jiménez-Muñoz, J. C., Cristóbal, J., Sobrino, J. A., та ін. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *X PonsIEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2009. Vol. 47, No. 1. C. 339.
  20. Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., environment, L. P.-R. S. of, та ін. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Elsevier.
  21. Sun, D., Research, R. P.-J. of geophysical, 2003, U. Estimation of land surface temperature from a Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-8). *Journal of geophysical research: atmospheres*. 2003. Vol. 108, No. D11. C. 4326.
  22. Pedelty, J., Devadiga, S., Masuoka, E., та ін. Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS instruments. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2007. C. 1021–1025.
  23. Wan, Z., Remote, J. D.-I. T. on geoscience and, 1996, U. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *Transactions on geoscience and remote sensing*. 1996. Vol. 34, No. 4.
  24. Li, Z., Tang, B., Wu, H., та ін. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. Elsevier.
  25. Mao, K., Qin, Z., Shi, J., та ін. A practical split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26, No. 15. C. 3181–3204.
  26. Landsat 8 OLI and TIRS Calibration Notices | U.S. Geological Survey: URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-oli-and-tirs-calibration-notice>(дата звернення: 25.11.23).
  27. Li, S., Access, G. J.-I., 2018, U. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm. *IEEE Access*. 2018.
  28. Sobrino, J., Raïssouni, N., Environment, Z. L.-R. S. of, та ін. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. Elsevier. 2001. Vol. 75. C. 256–266.
  29. Valor, E., Environment, V. C.-R. sensing of, 1996, undefined. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. Elsevier. 1995. Vol. 57. C. 167–184.
  30. Griend, A. A. Van De, Owe, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*. 1993. Vol. 14, No. 6. C. 1119–1131.
  31. Li, S., Access, G. J.-I., 2018, U. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm. *IEEE Access*.
  32. Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., та ін. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *A PlazaIEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2008. Vol. 46, No. 2.

## **Література**

1. Adamo, S. B., Sherbinin, A. de. Population distribution, urbanization, internal migration, and development: An international perspective. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2011. C. 161–195.

2. Svirejeva-Hopkins, A., Schellnhuber, H. J., Pomaz, V. L. Urbanised territories as a specific component of the Global Carbon Cycle. *Ecological Modelling*. 2004. Vol. 173, No. 2–3. C. 295–312.
3. Campbell, S., Remenyi, T. A., White, C. J., та ін. Heatwave and health impact research: A global review. *Health & place*. 2018. Vol. 53. C. 210–218.
4. Gosling, S. N., McGregor, G. R., Páldy, A. Climate change and heat-related mortality in six cities Part 1: model construction and validation. *International journal of biometeorology*. 2007. Vol. 51. C. 525–540.
5. Akbari, H., Kurn, D. M., Bretz, S. E., та ін. Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and buildings*. 1997. Vol. 25, No. 2. C. 139–148.
6. Voogt, J. A., Oke, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of the environment*. 2003. Vol. 86, No. 3. C. 370–384.
7. Prihodko, L., Goward, S. N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 60, No. 3. C. 335–346.
8. Dash, P., Göttsche, F.-M., Olesen, F.-S., та ін. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23, No. 13. C. 2563–2594.
9. Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., та ін. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote sensing of the environment*. 2013. Vol. 131. C. 14–37.
10. Sekertekin, A., Kutoglu, S. H., Kaya, S. Evaluation of spatio-temporal variability in Land Surface Temperature: A case study of Zonguldak, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*. 2016. Vol. 188. C. 1–15.
11. Naughton, J., McDonald, W. Evaluating the variability of urban land surface temperatures using drone observations. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 14. C. 1722.
12. Senay, G. B., Schauer, M., Velpuri, N. M., та ін. Long-term (1986–2015) crop water use characterization over the Upper Rio Grande Basin of the United States and Mexico using Landsat-based evapotranspiration. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 13. C. 1587.
13. Maffei, C., Alfieri, S. M., Menenti, M. Relating spatiotemporal patterns of forest fires burned area and duration to diurnal land surface temperature anomalies. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, No. 11. C. 1777.
14. Townshend, J. R., Justice, C. O., Skole, D., та ін. The 1 km resolution global data set: Needs of the international geosphere biosphere program! *International Journal of Remote Sensing*. 1994. Vol. 15, No. 17. C. 3417–3441.
15. Meng, X., Cheng, J., Sensing, S. L.-R., та ін. Estimating land surface temperature from Feng Yun-3C/MERSI data using a new land surface emissivity scheme. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. C. 1247.
16. Becker, F. Toward a local split window method over the land surface. *Int. J. Remote Sensing*. 1990. Vol. 11. C. 19–34.
17. Yu, X., Guo, X., Sensing, Z. W.-R., та ін. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm, and single channel. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. C. 6.
18. Qin, Z., Karnieli, A., Remote, P. B.-I. journal of, та ін. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application

- to the Israel-Egypt border region. *International journal of remote sensing*. 2001. Vol. 22, No. 18. C. 3719–3746.
19. Jiménez-Muñoz, J. C., Cristóbal, J., Sobrino, J. A., та ін. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *X PonsIEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2009. Vol. 47, No. 1. C. 339.
  20. Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., environment, L. P.-R. S. of, та ін. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Elsevier.
  21. Sun, D., Research, R. P.-J. of geophysical, 2003, U. Estimation of land surface temperature from a Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-8). *Journal of geophysical research: atmospheres*. 2003. Vol. 108, No. D11. C. 4326.
  22. Pedely, J., Devadiga, S., Masuoka, E., та ін. Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS instruments. *IEEE International Geoscience and remote sensing Symposium*. 2007. C. 1021–1025.
  23. Wan, Z., Remote, J. D.-I. T. on geoscience and, 1996, U. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *Transactions on geoscience and remote sensing*. 1996. Vol. 34, No. 4.
  24. Li, Z., Tang, B., Wu, H., та ін. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. Elsevier.
  25. Mao, K., Qin, Z., Shi, J., та ін. A practical split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26, No. 15. C. 3181–3204.
  26. Landsat 8 OLI and TIRS Calibration Notices | U.S. Geological Survey: URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-oli-and-tirs-calibration-notice>(дата звернення: 25.11.23).
  27. Li, S., Access, G. J.-I., 2018, U. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm. *IEEE Access*. 2018.
  28. Sobrino, J., Raissouni, N., Environment, Z. L.-R. S. of, та ін. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. Elsevier. 2001. Vol. 75. C. 256–266.
  29. Valor, E., Environment, V. C.-R. sensing of, 1996, undefined. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. Elsevier. 1995. Vol. 57. C. 167–184.
  30. Griend, A. A. Van De, Owe, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*. 1993. Vol. 14, No. 6. C. 1119–1131.
  31. Li, S., Access, G. J.-I., 2018, U. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm. *IEEE Access*.
  32. Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., та ін. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *A PlazaIEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2008. Vol. 46, No. 2.

**МОНІТОРИНГ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ  
ЗАМІНИ ПІДКРАНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ МОНТАЖНО-  
ЗБИРАЛЬНОГО ЦЕХУ ПРОМИСЛОВОЇ БУДІВЛІ**

**MONITORING AND IMPROVEMENT OF PROJECT SOLUTIONS  
FOR THE REPLACEMENT OF UNDER-CRANED STRUCTURES OF  
THE ASSEMBLY SHOP IN AN INDUSTRIAL BUILDING**

**Фостащенко О.М.** к.т.н., доцент, **Добровольська О.Г.**, к.т.н., доцент, **Гондар С.О.**, магістрант, **Фостащенко Д.О.**, магістрант (Запорізький національний університет)

**Fostashchenko H.**, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, **Dobrovolska O.**, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, **Hondar S.**, M.Sc., **Fostashchenko D.**, M. Sc. (Zaporizhzhya National University)

*Визначено передумови для дослідження технічного стану підкранової конструкції після 50 років експлуатації двох мостових кранів вантажопідйомністю 20/5 т та 5 т на промисловому підприємстві. Виконаний моніторинг технічного стану 32 рядових та 8 крайніх залізобетонних конструкцій підкранових балок будівлі монтажного цеху в прольоті «В-Е» та доведена необхідність удосконалення проєктних рішень заміни зношених залізобетонних підкранових балок на сталеві підкранові балки.*

*Under-crane constructions serve for the movement of cranes and transfer the load from the lifting and transporting equipment to the frame of the building. The design term of operation of crane structures should be taken as equal to the period during which their full functionality is ensured.*

*The object of research is the assembly shop of an industrial building built in the early 60s of the last century. The building is one story, consisting of four longitudinal and one transverse span, and an open crane overpass located across the main spans. The overall dimensions of the assembly shop are 144×102 m, of which: four longitudinal spans of 18×120 m, and one transverse span of 24×102 m.*

*It was found that the under-crane beams of workshops work in difficult conditions: significant loads, intensive operation, aggressive environment, and elevated air temperatures.*

*The prerequisites for researching the technical condition of the crane structure after 50 years of operation of two overhead cranes with a load capacity of 20/5 t and 5 t at an industrial enterprise have been determined.*

*Monitoring of the technical condition of 32 ordinary and 8 extreme reinforced concrete structures of the crane beams of the assembly shop building in span "B-E" was carried out.*

*A horizontal survey of the column console was carried out and deviations were detected (using leveling). It was found that the columns of the building frame, on which*

*the crane beams rest, deviate from the horizontal by up to 210 mm. During the inspection, the destruction of the concrete of the shelves of the crane beams with exposure and corrosion of the reinforcement was found. As a result of the examination, it was found that almost 100% of all bolted connections of the crane track are broken.*

*The necessity of improving design solutions for replacing worn-out reinforced concrete crane beams with steel crane beams has been proven.*

*It has been proven that crane beams play an important role in ensuring the safety and efficiency of work in the assembly shop. Replacing reinforced concrete beams with metal ones can be an important step to improve these parameters.*

*Ключові слова: підкранові конструкції, моніторинг технічного стану, конструктивні рішення, сталеві підкранові балки.*

*Keywords: under-crane constructions, technical condition monitoring, structural solutions, steel under-crane beams.*

**Вступ.** Підкранові конструкції є невід'ємною частиною будь-якого великого цеху або промислового комплексу, де використовуються мостові крани. Вони служать для пересування кранів і передають на каркас будівлі навантаження від підйомально-транспортного устаткування. Крім того, підкранові конструкції забезпечують горизонтальну розв'язку колон із площини рами, передачу на вертикальні зв'язки між колонами поздовжніх зусиль від гальмівних сил, вітрових навантажень на торці будівлі та сприяють просторовій роботі каркаса. Основні несучі елементи підкранових конструкцій – підкранові балки, що мають різну конструктивну форму. Найчастіше для такого типу підйомально-транспортних систем, використовують наступний матеріал: сталь і залізобетон.

**Аналіз останніх досліджень.** Підкранові балки цехів працюють у складних умовах: значні навантаження, інтенсивна експлуатація, агресивне середовище, підвищені температури повітря. Завданням технічної експлуатації будівель та споруд має бути комплекс заходів, що забезпечують комфортне й безвідмовне використання їхніх приміщень і систем для певних цілей протягом терміну використання [1]. Фізичний знос конструкцій є однією з головних причин реконструкції будівель та їх елементів [2].

При підготовці програми обстеження монтажного цеху промислової будівлі узагальнювався досвід попередніх обстежень [3], чинні в Україні вимоги та нормативні документи стосовно оцінки технічного стану будівлі та конструкцій [4,5], забезпечення надійності експлуатації [6,7,8], вимоги до проектування сталевих конструкцій [9,10,11], монтажу будівельних конструкцій [12], конструювання та експлуатації вантажопідйомальних кранів [13,14,15], умови експлуатації: агресивний вплив довкілля, одночасна робота двох мостових кранів, конструктивні особливості –

кранова рейка на залізобетонних підкранових балках, які опираються на консолі залізобетонних колон.

Технічний огляд або експертне обстеження підкранових конструкцій повинні проводитися відповідно до [16]. Норми відхилень напрямних колій опорних мостових кранів, наведені в [17].

Нормативний документ [11] встановлює правила проектування конструкцій підкранових балок та інших підкранових конструкцій. Проектний термін експлуатації підкранових конструкцій слід приймати таким, що дорівнює періоду, протягом якого забезпечується їх повноцінна функціональність. Проектний термін експлуатації повинен бути підтверджений документально (наприклад, в плані технічного обслуговування).

У разі неможливості подальшої безпечної експлуатації, непридатності до ремонту в умовах, що склалися, а також у разі зміни умов експлуатації виникає необхідність заміни підкранових балок [3].

Підкранові конструкції можуть замінюватись повністю або частково, якщо є відповідне обґрунтування, в тому числі за:

- збільшення вантажопідйомності мостових кранів і їх габаритних розмірів, а також модернізації або посилення конструкції кранів, що викликають збільшення кранового навантаження;
- наявності поступальних руйнувань у вигляді тріщин;
- наявності значної кількості дефектів та конструктивних недоліків, що створюють небезпеку раптових руйнувань.

**Постановка мети і задач досліджень.** Метою дослідження є впровадження конструктивних рішень щодо заміни підкранових залізобетонних балок на сталеві балки в поздовжньому прольоті В-Е монтажної-збиральної цеху.

Опис об'єкта. Монтажник цех промислової будівлі побудований на початку 60-х років минулого сторіччя. Будівля одноповерхова, складається з чотирьох поздовжніх та одного поперечно розташованого прольотів, відкритої кранової естакади розташованої поперек основних прольотів. Габаритні розміри монтажної цеху 144×102м, з них: чотири поздовжні прольоти по 18×120м, один поперечний проліт – 24×102 м [3].

Будівля монтажної цеху обладнана мостовими кранами: в прольоті «В-Е» – крани вантажопідйомністю  $Q=20/5$  т та  $Q=5$  т;

В прольотах «Е-К», «К-Н», «Н-С» – крани вантажопідйомністю  $Q=10$  т та  $Q=5$  т;

Колони – збірні, залізобетонні, суцільні. Перетин середніх колон 400×800 мм, перетин крайніх колон 800×400 мм. Колони змонтовані з кроком 6,0 м.

Висота колон до низу кроквяних конструкцій чотирьох основних поздовжніх прольотів складає – 10,6 м.



Усі колони жорстко защемлені у фундаментах. Стійкість колон у поздовжньому напрямку будівлі забезпечується вертикальними зв'язками та підкрановими балками. Зв'язки по колонах виконані з металевих прокатних куточків. Будівля цеху має температурний шов по осі 11.

Збірні залізобетонні ферми покриття виконані із попереднім напруженим нижнім поясом.

Ферми – залізобетонні, довжиною 18,0 м. Спираються на головки колон і передають навантаження від конструкцій покриття покрівлі та власної ваги на гілки колон.

Підкранові балки змонтовані збірними залізобетонними тавровими перерізами, висотою 1,0 м, довжина балок – 6,0 м [3]. Балки кріпляться до колон за допомогою зварювання заставних деталей на ребрі балки та полиці колони. Підкранові залізобетонні балки запроєктовані за серією КЭ-01-04.

**Методика досліджень.** Для дослідження технічного стану підкранової конструкції після 50 років експлуатації двох мостових кранів вантажопідйомністю 20/5 т та 5 т необхідно дослідити технічний стан 32 рядових та 8 крайніх конструкцій підкранових балок будівлі монтажно-збирального цеху в прольоті «В-Е». У висновках [3] приведені результати обстеження монтажно-збирального цеху промислової будівлі згідно [16,17,18], при обстеженні оцінювався технічний стан конструктивної системи об'єкта. Брався до уваги рівень придатності технічного стану конструктивної системи об'єкта в цілому, який визначається на підставі технічного стану окремих конструкцій з врахуванням їх категорії відповідальності. Згідно [3] враховується технічний стан конструкцій, які мають прямий вплив на безпеку експлуатації підкранових колій, звернено увагу на технічний стан залізобетонних конструкцій каркаса, на яких зафіксовано процес зниження опорної здатності шляхом наявності наступних дефектів і пошкоджень: корозії бетону (зниження міцності бетону), тріщин в захисному шарі бетону уздовж стрижневої арматури внаслідок її корозії, відшарування захисного шару бетону. Проведено обстеження горизонталі консолі колони та виявлені відхилення шляхом нівелювання. Встановлено, що колони каркаса будівлі, на які опираються підкранові балки, мають відхилення від горизонталі до 210 мм, (див. рис. 1, а). Відповідно до проекту обпирання підкранових балок на консоль колони має бути виконане через заставні деталі, що з'єднуються між колоною та підкрановою балкою. Фактично – обпирання виконано через набір сталевих пластин, розміщених дискретно без відповідного закріплення до консолі колони (всі вони мають зрушення у двох площинах). При обстеженні виявлені руйнування бетону полиць підкранових балок з оголенням та корозією арматури (рис. 2).

В результаті обстеження було виявлено, що практично 100% всіх болтових з'єднань кріплення кранової колії мають порушення (рис. 3).

Руйнування захисного шару бетону по низу балок з оголенням та корозією арматури (рис. 4).

Сколи у верхній полиці залізобетонної підкранової балки (рис. 4, 5).



Рис. 1, а. Відхилення від горизонталі регулюючі пластини між балкою та оголовком колони



Рис. 1, б. Відхилення від горизонталі регулюючі пластини між балкою та оголовком колони



Рис. 2. Руйнування бетону полиць підкранових балок з оголенням та корозією арматури



Рис. 3. Порушення болтових з'єднань кранової колії



Рис. 4. Сколи у верхній полиці залізобетонної підкранової балки



Рис. 5. Сколи у верхній полиці залізобетонної підкранової балки

**Результати досліджень.** Технічний стан підкранових балок, який повинен забезпечувати безпечну роботу системи «ходові колеса – крановий шлях» мостових кранів, не відповідає вимогам нормативно-технічної документації та не забезпечує безпечну експлуатацію мостових кранів.

Для реалізації заходів з відновлення підкранової колії вирішено розробити проєкт щодо заміни залізобетонних підкранових балок на сталеві підкранові балки. У зв'язку з цим, були розроблені наступні конструктивні рішення (рис. 6 – 10):

- демонтаж залізобетонних балок разом з підкрановою колією (рис.7);
- демонтаж кріплень балок до колони та регулюючих пластин;
- демонтаж жорсткої бетонної вставки між балкою та колоною;
- підсилення консолі колони з монтажем кріплення анкерного блоку для подальшого встановлення металевих підкранових балок;
- розрахунок та розробка металевих балок, відповідно діючих навантажень, та врахування існуючих відміток верху балки;
- монтаж балок з регулюючими вставками відповідно схеми нівелювання відміток верху консолі колони (рис. 8);
- розробка та встановлення тормозних елементів між балкою та колоною;
- встановлення рейки відповідно технічних характеристик мостових кранів та монтажних схем, що наведені у [14].

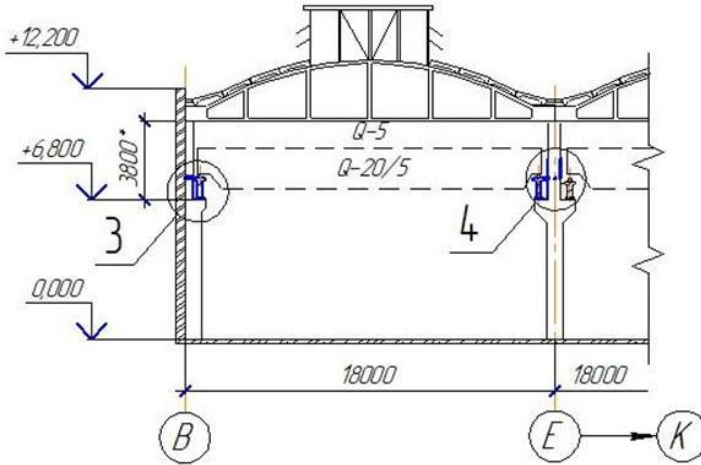


Рис. 6. Поперечний розріз монтажного цеху промислової будівлі в осях В-Е

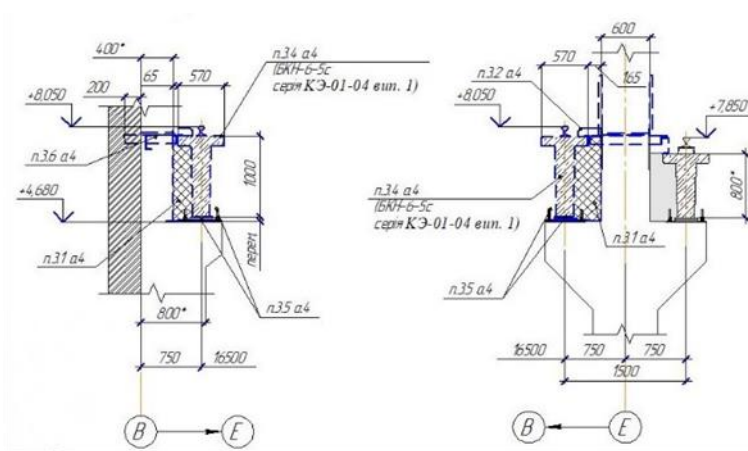


Рис. 7. Схеми демонтажу залізобетонної підкранової балки

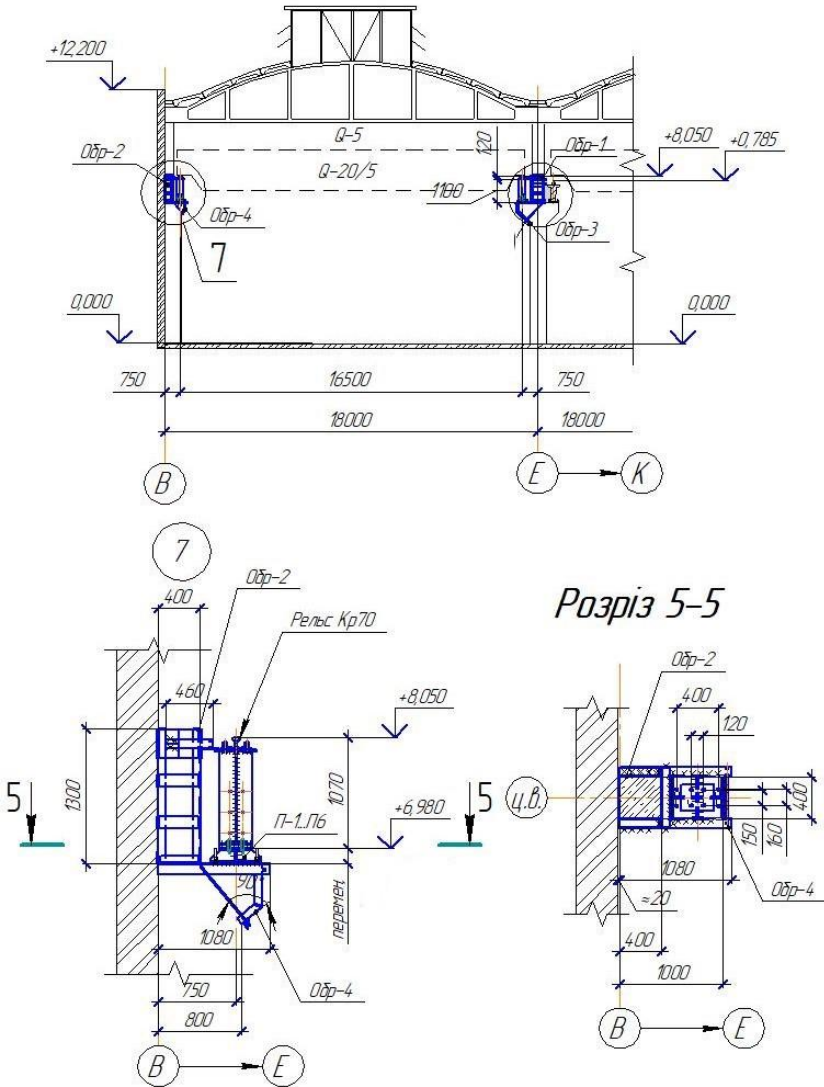


Рис. 8. Монтажні схеми сталеві підкранової балки

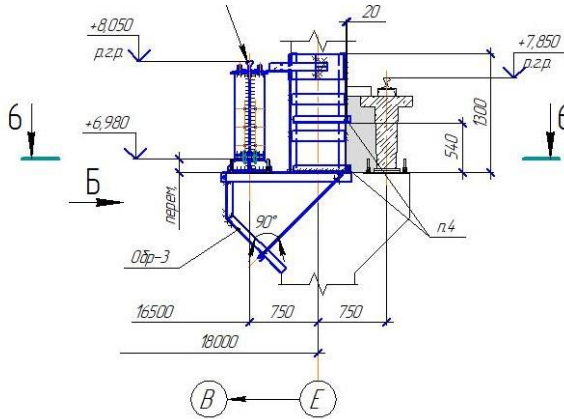


Рис. 9. Вузол кріплення підкранової балки до колони

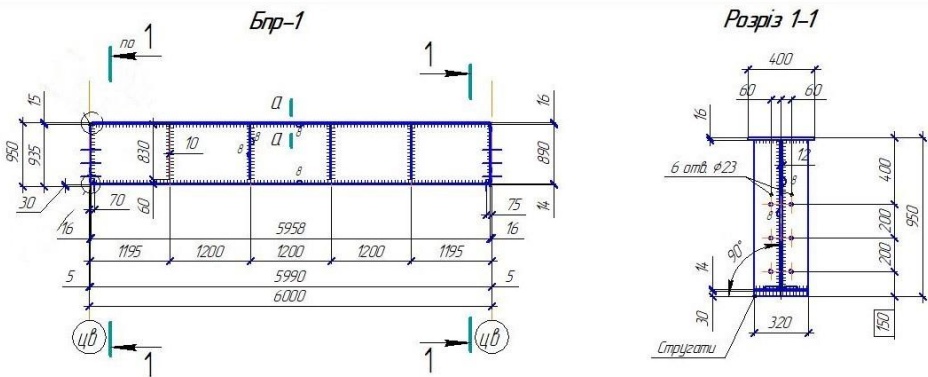


Рис. 10. Рядова підкранова балка

### Висновки

1. Доведено, що підкранові балки грають важливу роль у забезпеченні безпеки та ефективності робіт в монтажному цеху. Заміна залізобетонних балок на металеві може бути важливим кроком для покращення цих параметрів.

2. Удосконалення проектних рішень щодо заміни залізобетонних підкранових балок на металеві допоможе зменшити вагу конструкції, що вплине на її експлуатаційні характеристики та збільшить завантаженість

кранового обладнання: вага однієї залізобетонної балки становить 8 тонн, тоді як вага металевої балки становить 1.6 тон.

3. Запроектвані металеві підкранові балки можуть бути виготовлені з урахуванням конкретних вимог і потреб монтажного цеху, що дозволяє оптимізувати конструкцію для конкретних завдань.

4. Металеві підкранові балки відзначаються високою міцністю і стійкістю до корозії, що робить їх оптимальними для використання в умовах виробничого середовища монтажного цеху. Важливим аспектом є зниження витрат на обслуговування та ремонт металевих підкранових балок порівняно з залізобетонними аналогами.

5. Результати дослідження та практичний досвід показують, що заміна залізобетонних підкранових балок на металеві може бути вигідною стратегією для багатьох промислових підприємств, сприяючи підвищенню продуктивності та зменшенню витрат.

## **References**

1. Yakymenko O.V. Tekhnichna ekspluatatsiia budivel ta sporud: navchalnyi posibnyk. Kharkiv: nats. un-t misk. hosp-va im. O.M.Beketova, 2019. 247 s.

URL: <https://tinyurl.com/3jzn7srh>

2. Klymenko Ye.V. Tekhnichna ekspluatatsiia ta rekonstruktsiia budivel i sporud: navchalnyi posibnyk. Kyiv: Tsentr navchalnoi literatury, 2004. 304 s.

URL: [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Klimenko\\_2004\\_304.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Klimenko_2004_304.pdf)

3. Zvit z obstezhennia, otsinky tekhnichnoho stanu, rozrobky rekomendatsiinykh robochykh kreslen z vidnovlennia tekhnichnoho stanu elementiv budivelnykh konstruksii dlia podalshoi bezpechnoi ekspluatatsii ta pasportyzatsii budivli montazhno-zbyralnoho tsekhу, korpus 2, m. Kryvyi Rih. Shifr 36.07.20/44.

4. Barashkyov A. Ya., Malyshev O.M. Otsiniuvannia tekhnichnoho stanu budivel ta inzhenernykh sporud: navchalnyi posibnyk. Kyiv: Osnova, 2008. 320 s.

URL: <https://library.knuba.edu.ua/node/572>

5. DSTU-N B V.1.2-18:2016 Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu. [Chynnyi vid 2017-04-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Ministerstvo rehionalnoho rozvytku budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. 2017. 47 s.

URL: [https://pdf.sop.zp.ua/standart\\_dstu-n\\_b\\_v\\_1\\_2-18\\_2016.pdf](https://pdf.sop.zp.ua/standart_dstu-n_b_v_1_2-18_2016.pdf)

6. DBN V.1.2-14:2018 Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel ta sporud. [Chynnyi vid 2019-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Ministerstvo rehionalnoho rozvytku budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. 2018. 33 s.

URL: <https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2018/12/DBN-V1214-2018.pdf>

7. ISO 2394 Zahalni pryntsyipy nadiinosti konstruksii.

URL: <https://tinyurl.com/ytmu9ud7>

8. ISO 8930 Zahalni pryntsyipy nadiinosti konstruksii. Perelik ekvivalentnykh terminiv.

URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=98223](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98223)

9. DBN V.2.6-198:2014 Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia. [Chynnyi vid 2015-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Ministerstvo rehionalnoho rozvytku budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. 2014. 205 s.

URL: <https://tinyurl.com/3nj6sat5>

10. ISO 3898 Osnovy proektuvannia konstruksii. Notatky. Zahalni umovni poznyaky.

URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=98499](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98499)

11. DSTU-N B EN 1993-6:2012 Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruksii. Chastyna 6. Pidkranovi konstruksii (EN 1993-6:2007, IDT). [Chynnyi vid 2013-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Ukrainyskyi naukovo-doslidnyi ta proektnyi instytut stalevykh konstruksii im. V.M. Shymanovskoho. 2013. 86 s.

URL: <https://tinyurl.com/bdzxtwj3>

12. DSTU B V.2.6-200:2014 Konstruksii metalevi budivelni. Vymohy do montazhu. [Chynnyi vid 2015-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Ukrainyskyi naukovo-doslidnyi ta proektnyi instytut stalevykh konstruksii im. V.M. Shymanovskoho. 2015. 77 s.

URL: [https://dbn.co.ua/\\_ld/12/1206\\_dstu\\_b\\_v2\\_6\\_200.pdf](https://dbn.co.ua/_ld/12/1206_dstu_b_v2_6_200.pdf)

13. DSTU EN 15011:2018 Krany vantazhopidiimalni. Mostovi ta kozlovi krany (EN 15011:2011 + A1:2014, IDT).

[http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=81171](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81171)

14. DSTU EN 15011:2022 Krany vantazhopidiimalni. Mostovi ta kozlovi krany (EN 15011:2020, IDT).

URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=99169](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99169)

15. DSTU EN 13001-3-3:2018 Krany vantazhopidiimalni. Zahalni polozhennia konstruiuvannia. Chastyna 3-3. Hranychni stany ta pereviriannia mitsnosti kontaktiv koleso/reika (EN 13001-3-3:2014, IDT).

URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=78260](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78260)

16. NPAOP 0.00-6.18-04 Poriadok provedennia tekhnichnoho ohliadu, vyprobuvannia ta ekspertnoho obstezhennia (tekhnichnoho diahnostuvannia) mashyn, mekhanizmiv, ustatkovannia pidvyshchenoi nebezpeky.

URL: <https://tinyurl.com/4a7zb8my>

17. NPAOP 0.00-1.80-18 Pravyla okhorony pratsi pid chas ekspluatatsii vantazhopidiimalnykh kraniv, pidiimalnykh prystroiv i vidpovidnoho obladnannia.

URL: <https://tinyurl.com/3jp5nt8r>

18. OMD 00120253.001-2005 Metodyka provedennia ekspertnoho obstezhennia (tekhnichnoho diahnostuvannia) kraniv mostovoho typu. [Chynnyi vid 2006-11-15]. Vyd. ofits. Kharkiv : Pidiomno-transportna akademiia nauk Ukrainy. 2006. 160 s.

URL: [https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/omd\\_00120253.001-2005.pdf](https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/omd_00120253.001-2005.pdf)



## **Література**

1. Якименко О.В. Технічна експлуатація будівель та споруд: навчальний посібник. Харків: нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М.Бекетова, 2019. 247 с.  
URL: <https://tinyurl.com/3jzn7srh>
2. Клименко Є.В. Технічна експлуатація та реконструкція будівель і споруд: навчальний посібник. Київ: центр навчальної літератури, 2004. 304 с.  
URL: [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Klimentko\\_2004\\_304.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Klimentko_2004_304.pdf)
3. Звіт з обстеження, оцінки технічного стану, розробки рекомендаційних робочих креслень з відновлення технічного стану елементів будівельних конструкцій для подальшої безпечної експлуатації та паспортизації будівлі монтажно-збирального цеху, корпус 2. Кривий Ріг. Шифр 36.07.20/44.
4. Барашиков А. Я., Малишев О.М. Оцінювання технічного стану будівель та інженерних споруд: навчальний посібник. Київ: Основа, 2008. 320 с.  
URL: <https://library.knuba.edu.ua/node/572>
5. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України. 2017. 47 с.  
URL: [https://pdf.sop.zp.ua/standart\\_dstu-n\\_b\\_v\\_1\\_2-18\\_2016.pdf](https://pdf.sop.zp.ua/standart_dstu-n_b_v_1_2-18_2016.pdf)
6. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель та споруд. [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України. 2018. 33 с.  
URL: <https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2018/12/DBN-V1214-2018.pdf>
7. ISO 2394 Загальні принципи надійності конструкцій.  
URL: <https://tinyurl.com/ytmu9ud7>
8. ISO 8930 Загальні принципи надійності конструкцій. Перелік еквівалентних термінів.  
URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=98223](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98223)
9. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України. 2014. 205 с.  
URL: <https://tinyurl.com/3nj6sat5>
10. ISO 3898 Основи проектування конструкцій. Нотатки. Загальні умовні позначки.  
URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=98499](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98499)
11. ДСТУ-Н Б EN 1993-6:2012 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 6. Підкранові конструкції (EN 1993-6:2007, IDT). [Чинний від 2013-07-01]. Вид. офіц. Київ : Український науково-дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. 2013. 86 с.

URL: <https://tinyurl.com/bdzxtwj3>

12. ДСТУ Б В.2.6-200:2014 Конструкції металеві будівельні. Вимоги до монтажу. [Чинний від 2015-07-01]. Вид. офіц. Київ : Український науково-дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. 2015. 77 с.

URL: [https://dbn.co.ua/ld/12/1206\\_dstu\\_b\\_v2\\_6\\_200.pdf](https://dbn.co.ua/ld/12/1206_dstu_b_v2_6_200.pdf)

13. ДСТУ EN 15011:2018 Крани вантажопідіймальні. Мостові та козлові крани (EN 15011:2011 + A1:2014, IDT)

[http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=81171](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81171)

14. ДСТУ EN 15011:2022 Крани вантажопідіймальні. Мостові та козлові крани (EN 15011:2020, IDT).

URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=99169](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99169)

15. ДСТУ EN 13001-3-3:2018 Крани вантажопідіймальні. Загальні положення конструювання. Частина 3-3. Граничні стани та перевіряння міцності контактів колесо/рейка (EN 13001-3-3:2014, IDT).

URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=78260](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78260)

16. НПАОП 0.00-6.18-04 Порядок проведення технічного огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки.

URL: <https://tinyurl.com/4a7zb8my>

17. НПАОП 0.00-1.80-18 Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання.

URL: <https://tinyurl.com/3jp5nt8r>

18. ОМД 00120253.001-2005 Методика проведення експертного обстеження (технічного діагностування) кранів мостового типу. [Чинний від 2006-11-151]. Вид. офіц. Харків: Підійомно-транспортна академія наук України. 2006. 160 с.

URL: [https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/omd\\_00120253.001-2005.pdf](https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/omd_00120253.001-2005.pdf)

UDC 625.855.3 [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10\(20\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10(20)-18)

## EFFECT OF DEICING AGENTS ON THE LOW-TEMPERATURE PERFORMANCE OF ASPHALT CONCRETE UNDER FREEZE-THAW CYCLING CONDITIONS

### ВПЛИВ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСФАЛЬТОБЕТОНУ В УМОВАХ ПОПЕРЕМІННОГО ЗАМОРОЖУВАННЯ-ВІДТАВАННЯ

**Khrystych O.V. Ph.D.in Engineering, Associate Professor, (Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia)**

**Христич О.В. к.т.н., доц. (Вінницький національний технічний університет, Вінниця)**

*The wide application of asphalt concrete in road construction has brought convenience to human travel, but road icing requires the application of deicing agents to prevent traffic accidents. However, the use of a deicing agent will also cause damage to the pavement material, so this paper carries out the research on the low-temperature performance of asphalt concrete with different concentrations of deicing agent solutions through the freeze-thaw cycle test. The test results show that with the increase in the number of freeze-thaw cycles, the five concentrations of deicing agent solution corresponding to the flexural tensile strength and maximum flexural tensile strain are decreasing trend. Although the deicing agent solution has a certain effect on the flexural tensile strength and maximum flexural tensile strain, the main effect on the reduction of the low-temperature performance of asphalt concrete is the frost damage caused by the freeze-thaw cycle.*

З постійним розвитком транспортної інфраструктури, широке застосування асфальтобетону в дорожньому будівництві принесло зручність для пересування людей. Проте взимку частка дорожньо-транспортних пригод, спричинених снігом та ожеледицею, серед усіх дорожньо-транспортних пригод досить висока, і ці ДТП часто призводять до людських жертв. Для усунення явища обледеніння доріг відділ управління дорожнім рухом зазвичай використовує протиожеледні речовини. Цей спосіб досягає чудових результатів, значно зменшуючи кількість дорожньо-транспортних пригод. Проте використання протиожеледних речовин спричиняє пошкодження асфальтобетону, а особливо надмірне і неправильне використання засобу, що в свою чергу значно знижує експлуатаційні властивості дорожнього покриття.

Для того, щоб з'ясувати вплив різних концентрацій розчину протиожеледної речовини на низькотемпературні характеристики асфальтобетону, в цій статті проведено дослідження низькотемпературних характеристик асфальтобетону з різними концентраціями розчину

протиожеледної речовини за допомогою випробування на поперемінне заморожування та відтавання.

Результати випробувань показують, що зі збільшенням кількості циклів заморожування-відтавання п'яти концентрацій розчину протиожеледної суміші, що відповідають межі міцності на розтяг при згині та максимальній деформації на розтяг при згині, мають тенденцію до зменшення, що свідчить про значний вплив кількості циклів заморожування-відтавання на пошкодження асфальтобетону. Чим більша концентрація протиожеледного реагенту, тим очевиднішим є зниження межі міцності на розтяг при згині та максимальна деформація на розтяг при згині. Хоча концентрація розчину протиожеледної суміші має певний вплив на межу міцності на вигин і максимальну деформацію на розтяг при вигині, основний вплив на зниження низькотемпературних характеристик асфальтобетону має пошкодження від морозного здимання, спричинене циклами замерзання-відтавання, що може призвести до серйозних пошкоджень внаслідок розриву бітумної оболонки. Корозія асфальтобетону під впливом протиожеледних реагентів може бути вторинним фактором. Протиожеледні речовини можуть знижувати адгезію асфальтобетону, що призводить до зменшення зв'язку між бітумом і заповнювачем, а це, в свою чергу, знижує експлуатаційні характеристики асфальтобетону.

*Keywords: asphalt concrete, deicing agent, low temperature performance, solution concentration, freeze-thaw cycle, road performance.*

*Ключові слова: асфальтобетон, протиожеледна речовина, низькотемпературні характеристики, концентрація розчину, цикл заморожування-відтавання, експлуатаційні характеристики асфальтобетону.*

**Introduction.** With the continuous development of transportation infrastructure in cold regions, asphalt concrete is increasingly applied in road construction[1]. However, in the cold season, the icing phenomenon on the road surface becomes a non-negligible problem, which not only affects traffic safety but also puts higher requirements on the performance of road materials. To solve this problem, the use of deicing agents has become a common means[2].

However, when selecting deicing agents, their effects on asphalt concrete performance need to be considered, especially under freeze-thaw cycle conditions[3]. Freeze-thaw cycle refers to the process of alternating freezing and thawing experienced by the road surface during the cold season, which puts higher requirements on the mechanical properties and durability of asphalt concrete[4][5]. Therefore, an in-depth study of the effects of different concentrations of deicing agents on the low-temperature performance of asphalt concrete under freeze-thaw cycle conditions is of great significance for optimizing the use of deicing agents and improving the performance of road usage. This study aims to systematically investigate the effects of different concentrations of deicing agents on the low-temperature performance of asphalt

concrete through experimental methods, to provide a scientific basis for road construction.

In this investigation, five concentrations of NaCl solutions, 1%, 2%, 3%, 4%, and 5%, were selected to conduct freeze-thaw cycle tests on beam specimens ( $250 \text{ mm} \pm 2.0 \text{ mm}$  in length,  $30 \text{ mm} \pm 2.0 \text{ mm}$  in width, and  $35 \text{ mm} \pm 2.0 \text{ mm}$  in height) of AC-20 asphalt concrete. The test parameters for a single cycle were: freezing temperature of  $-20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  and freezing time of  $24 \text{ h} \pm 0.5 \text{ h}$  for the test, and thawing temperature of  $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  and thawing time of  $24 \text{ h} \pm 0.5 \text{ h}$ . A total of 28 cycles were carried out and the low-temperature crack resistance tests were performed at the end of 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, and 28 cycles, and the test parameters included flexural tensile strength and maximum flexural tensile strain.

Table 1

Flexural tensile strength of asphalt concrete after multiple freeze-thaw cycles

Number of freeze-thaw cycles	Flexural tensile strength, MPa				
	1%NaCl	2%NaCl	3%NaCl	4%NaCl	5%NaCl
0	11,32	11,32	11,32	11,32	11,32
4	11,14	11,12	11,05	10,95	10,91
8	11,05	11,02	10,88	10,71	10,62
12	10,83	10,74	10,52	10,33	10,21
16	10,40	10,27	10,14	9,74	9,54
20	9,86	9,81	9,72	9,23	9,02
24	9,45	9,31	9,17	8,62	8,42
28	9,03	8,86	8,65	8,17	7,91

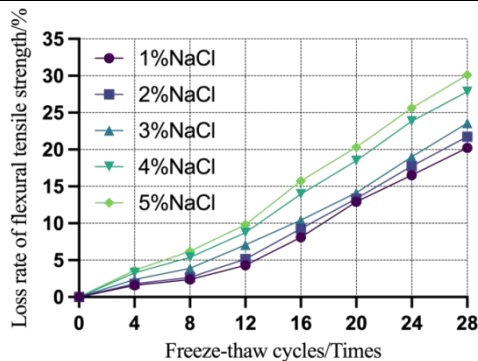


Fig. 1 Loss rate of flexural tensile strength of asphalt concrete after experiencing multiple freeze-thaw cycles

**Test results.** Low-temperature crack resistance test was performed on asphalt concrete after multiple freeze-thaw cycles, and the flexural tensile

strength and maximum flexural tensile strain are shown in Tables 1 and 2, and their corresponding loss rates are shown in Figures 1 and 2.

As can be seen from Table 1, with the increase in the number of freeze-thaw cycles, the flexural tensile strength corresponding to the five concentrations of deicing agent solutions showed a decreasing trend, indicating that the damage of freeze-thaw cycles on asphalt concrete is extremely significant; meanwhile, it was observed that the larger the concentration of deicing agent corresponding to the flexural tensile strength decreases more obviously, at the end of the 28 times of freeze-thaw cycles, the flexural tensile strength corresponding to the five concentrations of deicing agent solutions were 9,03 MPa, 8,86 MPa, 8,65 MPa, 8,17 MPa and 7,91 MPa respectively, which shows that the deicing agent has a certain impact on the flexural tensile strength of asphalt concrete. Simultaneously, it can be observed from Fig. 1 that the loss rate for the first 12 freeze-thaw cycles is lower than the loss rate at 12-28 cycles. At the end of 28 cycles, the loss of flexural tensile strength corresponding to five concentrations of deicing agent solutions was 20.22%, 21.73%, 23.58%, 27.83%, and 30.12%, respectively.

Table 2

Maximum flexural tensile strain of asphalt concrete after multiple freeze-thaw cycles

Number of freeze-thaw cycles	Maximum flexural tensile strain, $\mu\epsilon$				
	1%NaCl	2%NaCl	3%NaCl	4%NaCl	5%NaCl
0	2963	2963	2963	2963	2963
4	2915	2910	2901	2883	2871
8	2892	2884	2873	2842	2824
12	2835	2810	2799	2761	2741
16	2723	2689	2671	2614	2589
20	2627	2594	2578	2525	2493
24	2535	2508	2493	2437	2386
28	2463	2431	2417	2373	2307

As can be seen from Table 2, with the increase in the number of freeze-thaw cycles, the maximum flexural tensile strain corresponding to the five concentrations of deicing agent solutions showed a decreasing trend, indicating that the damage of freeze-thaw cycles on asphalt concrete is quite significant; simultaneously observed that the larger the concentration of the deicing agent corresponds to the maximum flexural tensile strain decreased more obviously, at the end of the 28 times of freeze-thaw cycles, the maximum flexural tensile strain corresponding to the five concentrations of deicing agent solutions were 2463  $\mu\epsilon$ , 2431  $\mu\epsilon$ , 2417  $\mu\epsilon$ , 2373  $\mu\epsilon$  and 2307  $\mu\epsilon$ , respectively, indicating that the deicing agent has a certain influence on the maximum flexural tensile strain of asphalt concrete. Meanwhile, it is observed from Fig. 2 that the loss rate in

the first 12 freeze-thaw cycles is lower than the loss rate at 12-28 cycles. At the end of 28 cycles, the loss of maximum flexural tensile strain corresponding to five concentrations of deicing agent solutions was 16.85%, 17.95%, 18.43%, 19.91%, and 22.14%, respectively.

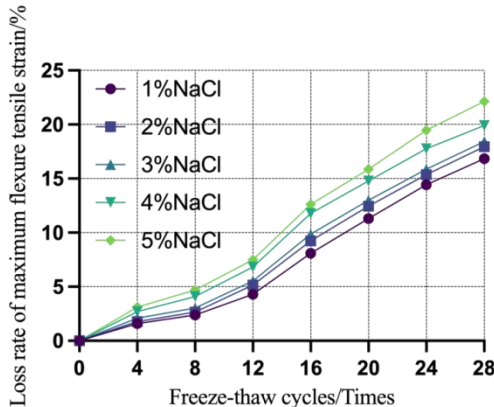


Fig. 2 Loss rate of maximum flexural tensile strain of asphalt concrete after experiencing multiple freeze-thaw cycles

Comprehensive analysis of the experimental results of flexural tensile strength and maximum flexural tensile strain shows that although the flexural tensile strength and maximum flexural tensile strain corresponding to the five concentrations of deicing agent solutions are different, the difference is not significant (at the end of 28 cycles, the loss rate of flexural tensile strength ranges from 20%-31%, and the loss of maximum flexural tensile strain ranges from 16% to 23%). Therefore, the greatest influence on the low-temperature performance reduction is the freezing and expansion damage of the freeze-thaw cycle, the freezing and expansion force caused by solution freezing will tear the asphalt membrane and cause serious damage; followed by the erosion damage of the deicing agent on the asphalt concrete, which may be due to the deicing agent reduces the adhesion of the asphalt, resulting in a decrease in the bonding force between asphalt and aggregates, which leads to a reduction in the performance of the asphalt concrete.

**Conclusion.** In this paper, by comparing and analyzing the experimental data of flexural tensile strength and maximum flexural tensile strain, the following conclusions can be drawn:

1. with the increase in the number of freeze-thaw cycles, the five concentrations of deicing agent solution corresponding to the flexural tensile strength and maximum flexural tensile strain have a decreasing trend, which

indicates that the freeze-thaw cycle on the asphalt concrete damage is significant.

2. The larger the concentration of deicing agent corresponding to the flexural tensile strength and maximum flexural tensile strain decreased more obviously.

3. From the loss rate of flexural tensile strength and maximum flexural tensile strain, it can be observed that the loss rate is low in the first 12 freeze-thaw cycles, while it increases in the 12-28 cycles. This may imply that asphalt concrete is relatively more resistant to freeze-thaw cycles in the initial stages, but the damage increases as the number of cycles increases.

4. Although the concentration of the deicing agent solution affects the flexural tensile strength and maximum flexural tensile strain, the main effect on the reduction in the low-temperature performance of the asphalt concrete is the frost heave damage induced by the freeze-thaw cycles. Freeze-up forces can cause tearing of the asphalt membrane, resulting in severe damage. Erosion damage to asphalt concrete by the deicing agent may be a secondary influence. Deicing agents may reduce the bonding of asphalt, resulting in a reduction in the bond between asphalt and aggregate, thus reducing the performance of asphalt concrete.

## **References**

1. Yang Liu and Ping Li, "Study on Temperature Field Prediction Model and Anti Icing Technology of Asphalt Pavement in Winter of Gansu Province," Master, Lanzhou University of Technology, 2018.
2. Y. Hassan, A. O. Abd El Halim, A. G. Razaqpur, W. Bekheet, and M. H. Farha, "Effects of Runway Deicers on Pavement Materials and Mixes: Comparison with Road Salt," *J. Transp. Eng.*, vol. 128, no. 4, pp. 385–391, Jul. 2002, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:4(385).
3. Ping Li, Xiying Wei, Tengfei Nian, Yang Liu, and Yu Mao, "Freezing Point Test of Deicers on Asphalt Pavement in Seasonal Frozen Region Bulletin of the Chinese Ceramic Society," *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, vol. 38, no. 05. pp. 1561–1567, 2019.
4. Ying Wang, Pin Li, Tengfei Nian, and Jibin Jiang, "Short-term Water Damage Characteristics of Asphalt Mixture Based on Dynamic Water Scour Effect," *J. Jilin Univ. Technol. Ed.*, vol. 50, no. 1, pp. 174–182, 2020.
5. H. Wu, P. Li, T. Nian, G. Zhang, T. He, and X. Wei, "Evaluation of asphalt and asphalt mixtures' water stability method under multiple freeze-thaw cycles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, p. 117089, Dec. 2019, doi 10.1016/j.conbuildmat.2019.117089.



UDC 691.335:069.44

## FEASIBILITY OF USING GEOPOLYMER SOLUTION IN THE CONSERVATION OF ARCHITECTURAL MONUMENTS

### ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ГЕОПОЛІМЕРНОГО РОЗЧИНУ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ПАМ'ЯТОК АРХІТЕКТУРИ

**Chernieva O., Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Ukraine); Morgenstern H., Dr.-Ing., Head of the Conservation and Repair Working Group (AG4) (Institute for Building Materials Research RWTH Aachen University, Germany); Raupach M., Dr.-Ing., Univ.-Prof. (Institute for Building Materials Research RWTH Aachen University, Germany)**

**Чернєва О., к.т.н., доц. (Одеська державна академія будівництва та архітектури, Україна); Моргенштерн Х., д.т.н., керівник робочої групи консервації та ремонту (AG4) (Інститут дослідження будівельних матеріалів RWTH Аахенського університету, Німеччина); Раупах М., д.т.н., проф. (Інститут дослідження будівельних матеріалів RWTH Аахенського університету, Німеччина)**

*Preservation and maintenance of architectural monuments have always been the number one task for civil engineers. In this context, the engineer encounters a “wagon load” of problems. On the one hand, there are strict requirements for the composition of materials used for restoration. On the other hand, it is the almost insurmountable challenge of selecting the right materials with the essential properties for the proper restoration of an architectural monument. Fixing of cracks and cavities is crucial for the durability of reinforced concrete and stone structures. These need to be treated scientifically to ensure usability.*

*In this setting, the use of Epoxy resins has become common. While Epoxy resins perform well under certain circumstances, they have many disadvantages such as heat instability, high costs, high resource demand, and serious health and environmental hazards. Furthermore, Epoxy resins are proscribed in monument preservation. To overcome the potential disadvantages of Epoxy resins, Geopolymers offer a promising alternative. Geopolymers are an environmentally friendly and durable substitute with low viscosity, supported by high-temperature stability. Using inorganic additives, geopolymer can expand and create a preload during solidification; this is a salient favorable feature since any decrease in volume will lead to the creation of a new cavity or crack of a smaller size. According to previous studies [1], the implementation of this low-CO<sub>2</sub> geopolymer cement in construction and civil engineering would reduce CO<sub>2</sub> emissions caused by the cement and concrete industry by 80%*

*This article presents the main advantages and disadvantages of the proposed*

*geopolymer solution, in comparison to the ordinary cement mortar. The authors present the argument for the expediency of using a geopolymer solution in the reconstruction of architectural monuments.*

*Збереження та утримання пам'яток архітектури завжди було завданням номер один для інженерів-будівельників. У зв'язку з цим інженер стикається з величезною кількістю проблем. З одного боку, це жорсткі вимоги до складу матеріалів, які використовуються для реставрації. З іншого боку, це неможливість підібрати відповідні властивості матеріалів для належної реставрації пам'ятки архітектури. Усунення тріщин та порожнин має вирішальне значення для довговічності залізобетонних та кам'яних конструкцій. Щоб забезпечити їх експлуатаційну придатність, потрібен науковий підхід. Для вирішення цього питання зазвичай використовують епоксидні смоли. Хоча епоксидні смоли добре працюють за певних обставин, але вони мають багато недоліків, таких як чутливість до нагрівання, висока вартість, високі вимоги до ресурсів і небезпека для навколишнього середовища та здоров'я. Крім того, епоксидні смоли заборонені при охороні пам'яток. Щоб подолати потенційні недоліки епоксидних смол, геополімери пропонують багатообіцяючу альтернативу. Геополімери є екологічно чистим і довговічним заміником з низькою в'язкістю, що підтримується високотемпературною стабільністю. Завдяки неорганічним добавкам геополімер при затвердінні розширюється і створює попереднє навантаження, це помітна перевага, оскільки будь-яке зменшення об'єму призведе до утворення нової порожнини або тріщини меншого розміру. Згідно з попередніми дослідженнями [1], застосування цих геополімерних цементів з низьким вмістом CO<sub>2</sub> у будівництві та цивільній інженерії зменшить викиди CO<sub>2</sub>, спричинені цементною та бетонною промисловістю, на 80%.*

*У статті наведено основні переваги та недоліки геополімерного розчину, приводиться його порівняння зі звичайним цементним розчином. Автори обґрунтовують доцільність використання геополімерного розчину при реконструкції пам'яток архітектури.*

*Keywords: geopolymer, epoxy resins, restoration, cracks*

*Ключові слова: геополімер, епоксидні смоли, відновлення, тріщини*

## **Introduction**

On the question of ensuring the preservation of architectural monuments, the main legislative document is the Venice Charter. Article 10 of the Venice Charter says: "Where traditional techniques prove inadequate, the consolidation of a monument can be achieved by the use of any modern technique for conservation and construction, the efficacy of which has been shown by scientific data and proved by experience" [2]. According to Article 12 of the Venice Charter "Replacements of missing parts must integrate harmoniously with the whole, but at the same time must be distinguishable from the original so that restoration does not falsify the artistic or historic evidence" [2].

The use of new materials is always decided on a case-by-case basis together with the responsible monument protection office; there is no general, material-

specific regulation [3].

According to the above arguments, the use of geopolymer-based solutions for filling cracks and chips in architectural masonry is possible and does not contradict current rules and regulations.

### **Goals and objectives of the study.**

Under the circumstances, this technical paper attempts to discuss the nature of geopolymer binders and presents the line of reasoning to support their utilization in the new era for the restoration of buildings.

### **What is Geopolymer?**

Geopolymer mortars - what are they - a long-forgotten past or a potential bright prospect for the ecological construction of the future?

Looking into history and drawing an analogy between the properties of modern geopolymer mortars and Roman cement or the stones of the Egyptian pyramids, it becomes clear that our ancestors already knew the recipe for this durable and corrosion-resistant material. However, with the development of Portland cement and its mass production and use, people stopped thinking about the environmental friendliness of materials and began to inconsiderately erect buildings from concrete. Now, due to a realistically foreseeable environmental disaster, long-forgotten geopolymers are becoming the object of modern construction science.

Geopolymers are inorganic, typically ceramic, alumino-silicate forming long-range, covalently bonded, non-crystalline (amorphous) networks. Obsidian (volcanic glass) fragments are a component of some geopolymer blends [4].

In 1979 Joseph Davidovits created and applied the term “Geopolymer” as the raw materials used in the synthesis of silicon-based polymers are mainly rock-forming minerals of geological origin [5]. Geopolymers are divided into two main groups: pure inorganic geopolymers and geopolymers containing organic substances, synthetic analogs of naturally occurring macromolecules.

### **Main properties of Geopolymer vs Portland Cement**

Based on the precursor material geopolymer cement could be divided into slag-based geopolymer cement, rock-based geopolymer cement, fly ash-based geopolymer cement, and ferro-sialate-based geopolymer cement.

#### **a. Influence of location (source of feedstock)**

Research by Australian scientists McLellan, Williams, Lay, Arie van Riessen, and Corder (2011) proves the environmental friendliness and cost-effectiveness of using geopolymers compared to ordinary Portland cement (OPC). For the proposed “typical” Australian geopolymer product, there is an estimated 44-64% improvement in greenhouse gas emissions over OPC, while on the flip side, the cost of these geopolymers can go up to twice as high as OPC [6]. However, the paper also indicates that those benefits are only

realizable given the most appropriate source of feedstock, supported by reduced transportation costs. The broad range of potential feedstock sources offers a very wide range of potential impacts: compared with emissions from OPC concrete, emissions from geopolymer concrete can be 97% lower and up to 14% higher. Each application for geopolymers therefore needs to be assessed based on its specific location, given that the impact of the location on the overall sustainability is one of the determining factors [6].

#### **b. Resistance to destructive/acidic impact**

The results of the study [7] show that geopolymer fine-grained concrete based on lignite ash has a higher resistance to the effects of a 3% sulfuric acid solution and a 5% sodium sulfate solution compared to cement mortars. The loss of strength when exposed to sulfuric acid for 120 days in these concretes did not exceed 3,6%. The acid and sulfate resistance of geopolymer materials is explained [7] by the high resistance to destruction under the influence of aggressive environments due to the three-dimensional polymer structure of the geopolymer binder compared to the multiphase structure of hydrated cement.

Work [8] shows that the acid resistance of geopolymer fine-grained concrete when using sodium hydroxide as an activator is higher than that of concrete with sodium silicate.

It has been established [9] that geopolymer concrete, despite its higher alkali content than cement concrete, is not characterized by an alkali-silica reaction.

When geopolymer fine-grained concrete is exposed to acids and sulfates in 28 days, according to [10], they lose no more than 2,5% of the original mass, while the mass of cement concrete samples decreases: in  $H_2SO_4$  solution - by more than 22%, and in HCl solution – 8%. The authors of [11] believe that the reason for the increased acid and sulfate resistance of geopolymer concretes is the absence of  $Ca(OH)_2$  in their composition.

#### **c. Reduced carbon emissions/environmental impact**

According to Komnitsas's (2011) study, geopolymer concrete made from fly ash (FA) and GBFS results in lower  $CO_2$  emissions than OPC concrete [12]. The environmental impact of geopolymer concrete is associated with the use of a sodium silicate solution, the production of which uses a pure glass cullet. However, discarded cullet can easily be used as an alternative source of silicate. Slag-based geopolymer concrete requires only a small amount of sodium silicate and therefore has a low environmental impact. In addition, the use of these wastes reduces the environmental impact associated with their disposal and the subsequent formation of hazardous leachates.

### **Problems of Geopolymers**

#### **a. Lack of supporting regulations**

The use of any building material must be based on:

- the relevant regulatory documents and standards governing and regulating the composition.

- the necessary physical, chemical, and mechanical properties of the output material,
- susceptibility to corrosion and the possibility of application.

Necessary supportive regulatory documents and standards must be created for Geopolymers. This would serve as an impetus to their increased use and expose the product to a wide consumer market.

**b. Drawback with “fast setting”**

Another problem of geopolymer binder was discussed by M. Criado (2009) and it is its poor workability: “Alkali-activated fly ash has a much greater plastic viscosity than ordinary Portland cement and is prone to fast setting” [13]. The viscosity can be adjusted with the right mixture, but the fast setting is a limiting factor for certain applications.

**c. Work environment safety**

It is essential, in an industrial work environment to give adequate importance to the issue of operational safety. Lack of proper care in handling sodium hydroxide used in the manufacture of geopolymers can cause chemical burns of varying degrees.

**d. Inadequate study on Geopolymer shrinkage**

Despite the great importance of the shrinkage of geopolymer and other alkali-activated binders, this phenomenon has not been sufficiently studied and results documented. This occasionally results in a high degree of unpredictability – this in turn adversely affects the use of these binders on an industrial scale.

**Geopolymer mortar as a repair material**

The possibility of using Geopolymer mortars as a gap compensation material for wind power plants has been proven. Good results were obtained, during the experimentation conducted by Hendrik Morgenstern and Michael Raupach [14]. The research successfully established the fact that the developed geopolymer could be used as a compensation material for gaps as small as 1mm.

The idea of the conducted study [15] was to establish the effectiveness of a material that would combine reasonable mechanical strength with a low viscosity allowing injectability. A metakaolin-based geopolymer and several inorganic fillers and additives were combined and tested regarding their applicability as an injection material. The experiment ascertained the effectiveness of the material to handle cracks and fill gaps.

The work of Frasson, Pelisser, and Silva (2020) have determined that the repairs made with geopolymer cement are a viable and efficient means of crack recovery. The geopolymer cement paste and an epoxy adhesive, as a reference, were used for the repairs [16]. The results showed a 13% decrease in compressive strength for unrepaired concrete, and 3,7% in concrete repaired with geopolymer. The binder presented mechanical performance similar to that of the epoxy resin on crack recovery [16].

High encouraging results were received by Yung-Chin Ding et al. [17], - the compressive strength test of the concrete substrate bonded with geopolymer paste showed up to 120% rate of repair. In comparison to Portland cement, the slag/fly ash-based geopolymer paste has very good future potential for further engineering development.

The study of geopolymers used to strengthen the masonry of historical heritage structures was further evaluated in the work of Baltazar et al (2019). The study investigated the fresh and hardened properties of grouts composed of natural hydraulic lime (NHL) and geopolymer as a useful repair and strengthening technique to intervene in old masonry buildings [18]. The experiments were conducted using a geopolymer made of fly ash, sodium hydroxide, and water. The effects of the replacement of NHL by the fly ash-based geopolymer (at the dosages of 0, 20, 50, 80, and 100%) on certain parameters, namely - stability, water absorption, compressive strength, and durability were investigated [18]. The results showed that geopolymer-based grout has several advantages based on mechanical strength, durability, and fresh stability; however, the improvement of their rheological performance proved to be a challenging task [18].

In the next work of Baltazar and Luis (2022) the experimental findings revealed that the silica-fume-based geopolymer grout has an inferior performance from a rheological point of view [19]. This finding was nevertheless compensated by the promising results in terms of mechanical strength when compared to traditional hydraulic-lime-based grout [19].

## **Conclusions**

The improvement of the technology related to the manufacture of geopolymer materials based on industrial waste and the wide implementation of these technologies in practice will allow for solving several scientific and technical tasks, which have been summarized below:

- to obtain building materials with higher technical and construction characteristics, especially with increased durability;
- to reduce the construction industry's need for natural raw materials;
- to solve the problem of storage and rational use of industrial waste;
- to significantly reduce the energy consumption of binder production;
- to reduce the cost of production of construction materials due to the use of cheaper raw materials.

In addition, replacing Portland cement with geopolymer binders in the construction industry will significantly reduce the amount of carbon dioxide emissions into the atmosphere.

Despite the significant advantages of geopolymer binders, they are not yet widely used in construction. The creation and sustainable development of the field of geopolymer building materials requires the accumulation and systematic analysis of data on the influence of various factors on the properties. This will

encourage the creation of a scientific and practical basis for the development of industrial technologies of geopolymer materials.

The unpredictability of The behavior in terms of the durability of Geopolymers can be overcome not only by a systematic study of the materials. The stated studies should be adequately supported by statistical information gathering on the effectiveness of the technologies employed based on real-life operation conditions.

Unreinforced masonry buildings in historic centers around the world have often gone unnoticed for centuries, without any protection from natural calamities. These buildings demonstrate low resistance to external influences, especially earthquakes. Earthquakes can cause severe damage to buildings and even result in the collapse of structures as a result of seismic effects on structures [20]. For this reason, repairing and strengthening damaged masonry structures is of paramount importance.

An analysis of the above studies shows that geopolymer grouts have many advantages over conventional repair materials due to their high viscosity, compressive strength, environmental friendliness, and excellent durability, as articulated in this document.

## References

1. Davidovits, J. Properties of geopolymer cements: Proceedings of the First international conference on alkaline cements and concretes, 1994. pp. 131-149.
2. Charta von Venedig: Internationale Charta über die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern und Ensembles (Denkmalbereiche). Venedig, 25. - 31. Mai 1964 (Fassung von 1989)
3. Gereon L. Kunststoffe in der Denkmalpflege? Ein kritischer Blick aus Sicht der Restaurierung. *Moderne Materialien und Konstruktionen: Dokumentation zum 29. Kölner Gespräch zu Architektur und Denkmalpflege in Köln*, Heft 37. 18. November 2019. S.21-28.
4. Kozhukova, N.I.; Chizhov, R.V.; Zhervovsky, I.V.; Strokova, V.V. Structure Formation of Geopolymer Perlite Binder Vs. Type of Alkali Activating Agent. *International Journal of Pharmacy & Technology*, vol. 8, Iss. no. 3, 2016. P. 15,339.
5. Davidovits, J. Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs: Proceedings of the Geopolymer 2002 Conference. 2002. p. 29.
6. McLellan, B. C; Williams, R. P.; Lay, J.; Arie van Riessen, A. and Corder G. D. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19, 2011. P. 1080–1090.
7. Khalifeh, Mahmoud; Saasen, Arild; Hodne, Helge; Motra, Hem Bahadur. Laboratory evaluation of rock-based geopolymers for zonal isolation and permanent P&A applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 175: 2019. P. 352–362. doi:10.1016/j.petrol.2018.12.065

8. Sata, V. Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cement Concr. Compos.* 2012. Vol. 34. P. 700-708.
9. Erdogan, S.T. Properties of ground perlite geopolymer mortars. *J. Mater. Civ. Eng.* 2015. Vol. 27(7). P. 1–10.
10. Garcia-Loderio, I. Alkali-Aggregate Reaction in Activated Fly Ash Systems. *Cement and Concrete Research.* 2007. N 37. P. 175-183.
11. Kim, Y.Y. Strength and durability performance of alkali-activated rice husk ash geopolymer mortar. *Sci. World. J.* 2014. Vol. 2014. P.1–11.
12. Komnitsas, K.A. Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities: *Procedia Engineering* 21. 2011. P. 1023-1032. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.2108
13. M. Criado and others. Alkali Activated Fly Ash: Effect of Admixtures on Paste Rheology. *Rheologica Acta*, 48.4, 2009. P. 447–455. doi.org/10.1007/s00397-008-0345-5
14. Morgenstern, H., Kunde, C. and Raupach, M. Development of a preloadable, temperature-stable, geopolymer-based gap compensation material: *ce/papers*, 6, 2023. P.1238-1243. doi.org/10.1002/cepa.2238
15. Morgenstern, H., Raupach, M. Low Viscosity, High-Temperature Stable Geopolymer for Crack Injection and Cavity Filling with Optional Increase of Volume and Preload. *SynerCrete 2023: International RILEM Conference on Synergising Expertise towards Sustainability and Robustness of Cement-based Materials and Concrete Structures.* RILEM Bookseries, vol 43. Springer, Cham. 2023. doi.org/10.1007/978-3-031-33211-1\_97
16. Frasson, B. J., Pelisser, F., & Silva, B. V. Concrete crack repair analysis with metakaolin-based geopolymer cement. *Revista IBRACON De Estruturas E Materiais*, 13(2), 2020. P. 298–313. doi.org/10.1590/S1983-41952020000200007
17. Ding YC, Cheng TW, Dai YS. Application of geopolymer paste for concrete repair. *Structural Concrete*, v. 18, n. 4, 2017. P. 561-570. <https://doi.org/10.1002/suco.201600161>
18. Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., Temporão, D., & Cidade, M. T. Experimental Assessment of Geopolymer Grouts for Stone Masonry Strengthening. *Key Engineering Materials*, 817, 2019. P. 507–513. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.817.507>
19. Baltazar, Luis G. Performance of Silica Fume-Based Geopolymer Grouts for Heritage Masonry Consolidation. *Crystals* 12, no. 2: 2022. P. 288. <https://doi.org/10.3390/cryst12020288>
20. Murat Maras M. Experimental behavior of injected geopolymer grout using styrene-butadiene latex for the repair and strengthening of masonry walls. *Advances in Structural Engineering*. 24(11), 2021. P. 2484-2499. doi:10.1177/13694332211001513



**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ МАСООБМІНУ, ТЕПЛО- Й  
МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ІНТЕНСИВНОМУ ЗНЕВОДНЕННІ  
ТА ТВЕРДІННІ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ ТІЛ  
(НА ПРИКЛАДІ БЕТОНУ ДЛЯ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ)**

**STUDY OF MASS TRANSFER, HEAT AND MASS TRANSFER  
PROCESSES DURING INTENSIVE DEHYDRATION AND  
HARDENING OF CAPILLARY-POROUS BODIES (ON THE EXAMPLE  
OF CONCRETE FOR ROAD PAVEMENT)**

**Човнюк Ю.В., к.т.н., доц. (Національний авіаційний університет, м. Київ), Кравчук В.Т., к.т.н., доц. (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ), Приймаченко О.В., к.т.н., доц. (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ), Чередніченко П.П., доц. (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ), Шудра Н.С., ст. викл. (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ)**

**Chovnyuk Y.V., Ph.D., Associate Professor (National Aviation University, Kyiv), Kravchuk V.T., Ph.D., Associate Professor (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv), Priymachenko O.V., Ph.D., Associate Professor (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv), Cherednichenko P.P., Associate Professor (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv), Shudra N.S., Senior Lecturer (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv)**

*Бетон є капілярно-пористим тілом (як при інтенсивному зневодненні, так і у процесі твердіння). Для аналізу тепло- та масообмінних процесів використана система диференціальних рівнянь тепломасопереносу, отримана академіком О.В. Ликовим. У роботі досліджений вплив інтенсивного зневоднення бетону на процеси вологообміну й вологопереносу. У якості критерію переносу вологи у процесі термообробки застосовується масообмінний критерій Кирпичова. Результати дослідження процесів тепло- й масопереносу при твердінні бетону порівнюються з даними, отриманими при моделюванні вказаних процесів за обраних граничних умов. Експериментальний та чисельний аналіз даних, їх співставлення з результатами аналітичного розв'язку математичної моделі показують можливість застосування останнього підходу для опису процесів тепло- й масопереносу при твердінні бетону.*

Concrete is a capillary-porous body (both during intensive dehydration and during curing). To analyze heat and mass transfer processes, the well-known system of differential equations of heat and mass transfer obtained by academician A.V. Lykov is usually used. This system takes into account all types of energy and matter transfer, including those arising from the interaction of heat and mass flows. In particular, in the process of steam-heat treatment due to increase in moisture content of concrete specimens, excessive lumps grow, which do not relax due to moisture transport. With the increase in moisture content (especially surface layers) and internal excess lumps, a volume-stress state in the material occurs, where tensile tangential stresses exist, which leads to the deformation of the material structure that is formed.

In this paper, the influence of intensive dehydration of concrete on the processes of moisture exchange and moisture transfer is investigated. Kirpichev's mass transfer criterion is applied as a criterion of moisture transfer in the process of heat treatment, which characterizes the intensity of external mass transfer compared to the external intensity of substance transfer. The main regularities of mass exchange and mass transfer in the processes of intensive dehydration of concrete are established.

The processes of heat and mass transfer are related to each other, so the purpose of this research is mathematical modelling of the processes of heat and moisture treatment of concrete in the generalized formulation of the problem. A concrete product in the form of a vertical plate of unlimited dimensions of finite thickness is considered as an object of research.

The results of investigation of heat and mass transfer processes during concrete hardening are compared with the data obtained by modelling of these processes under selected boundary conditions. The analysis of experimental data and their comparison with the results of numerical solution of the mathematical model show the possibility of its application to describe the processes of heat and mass transfer during concrete hardening.

*Ключові слова:* масообмін; тепломасоперенос; інтенсивне зневоднення; твердіння; капілярно-пористі тіла; бетонні вироби.

*Keywords:* Mass transfer; heat and mass transfer; intensive dehydration; curing; capillary-porous bodies; concrete products.

**Постановка проблеми.** Бетон, який затвердів, є капілярно-пористим тілом. Тому для аналізу тепломасообмінних процесів можна застосовувати систему диференціальних рівнянь тепломасопереносу, отриману академіком О.В. Ликовим. Система враховує усі види переносу енергії й речовини, у тому числі й ті, що виникають за рахунок взаємодії потоків тепла й маси.

У процесі паротеплової обробки внаслідок збільшення вологовмісту бетонних зразків, зростають надлишкові тиски, що не релаксують переміщенням вологи. Зі збільшенням вологовмісту (особливо поверхневих прошарків) й внутрішніх надлишкових тисків виникає об'ємно-пружний стан у матеріалі за наявності у останньому розтягуючих

дотичних напружень, що призводить до деформативності структури матеріалу, яка формується.

Важливо встановити, як саме інтенсивне зневоднення бетону впливає на процеси вологообміну й вологопереносу.

Дослідження процесів тепло- й масопереносу при твердінні бетону, проведені вченими, фахівцями-технологами, показують, що для можливості вивчення одночасно протікаючих й взаємодіючих складних процесів тепло- й масопереносу, як правило, слід здійснювати цілу низку спрощень і припущень, котрі призводять до значних похибок у результатах досліджень.

Отже, виникає нагальна потреба у обґрунтованому математичному моделюванні процесів тепловологісної обробки бетону при найбільш узагальненій постановці задачі.

**Аналіз публікацій по темі дослідження.** Явища переносу у капілярно-пористих тілах, закономірності їх сушки, а також процеси термічної обробки вологих матеріалів проведені у роботах [1-4].

Узагальнення досвіду й результати досліджень, пов'язаних з впливом різноманітних факторів на ефективність тепловологісної обробки бетонних виробів подані у роботах [5-8].

У роботі [9] наведені рівняння процесів теплопровідності й вологопровідності бетону із урахуванням екзотермії й гідратації. Щоб розв'язати ці рівняння аналітичним методом із урахуванням граничних умов, автор [9] максимально спрощує значення, котрі враховують екзотермію, провівши їх лінеаризацію. Втрати тепла, котрі відбуваються при випаровуванні вологи з поверхні бетонного виробу й мають велике значення при вивченні процесів тепло- й масопереносу, не враховуються. У роботах [10, 11] показано, що процеси тепло- й масопереносу пов'язані між собою, тому метою досліджень авторів [12] було математичне моделювання процесів тепловологісної обробки бетону при більш узагальненій постановці задачі. Вони розглядали бетонний виріб у вигляді вертикальної пластини необмежених розмірів скінченої товщини.

У даному дослідженні враховані результати робіт, отриманих авторами [1-12].

**Мета дослідження** полягає у обґрунтуванні математичної моделі процесів масообміну тепло- й масопереносу при інтенсивному зневодненні бетону та при його твердінні.

**Основна частина. 1. Моделювання масообміну й масопереносу у процесі інтенсивного зневоднення бетону.** Інтенсивне зневоднення бетону впливає на процеси вологообміну й вологопереносу. У якості критерію переносу вологи у процесі термообробки прийнятий масообмінний критерій Кирпичова, котрий характеризує собою інтенсивність зовнішнього масообміну у порівнянні з внутрішньою інтенсивністю переносу речовини [1]:

$$K_{im} = \frac{j(\tau) \cdot R}{a_m \cdot \rho_0 \cdot u_0}, \quad (1)$$

де:  $j(\tau)$  – зміна потоку маси від часу  $\tau$ ;  $a_m$  – коефіцієнт потенціалопровідності;  $\rho_0$  – початкова щільність речовини;  $R$  – універсальна газова постійна;  $u_0$  – початкова швидкість руху речовини.

Відомо, що критерій  $K_{im}$  змінюється від 0 до 2 у випадку параболічного розподілу вологовмісту у матеріалі.

При розв'язуванні задачі визначення критерію  $K_{im}$  необхідно дослідити зміни потоку маси  $j_m$  й коефіцієнту потенціалопровідності  $a_m$ . Дослідження проводились за умов звичайного пропарювання й комбінованої тепловолісної обробки (ТВО), у котрій на стадії ізотермічного прогрівання насичений водяний пар замінювали сухим гарячим повітрям з температурою ізотермічної витримки [4]. Кількість води, яка випаровується у кінці прогрівання складала  $q_m = (0,82; 1,85; 1,92) \text{ кг}/\text{м}^2$  для розчину, бетону й цементного каменю, відповідно, при звичайному пропарюванні, й  $(2,80; 3,78; 4,22) \text{ кг}/\text{м}^2$  при комбінованій ТВО (рис. 1).

Тривалість постійної швидкості випаровування залежить від початкового вологовмісту матеріалу, граничних умов та кінетики процесу гідратації.

Скінченний період характеризується падінням інтенсивності випаровування, котре настає при певній вологості матеріалу. При цьому масообмін із зовнішнім середовищем, лімітований процесами внутрішнього масопереносу, й відбувається поглиблення зони випаровування й зневоднення бетону від периферії до центру.

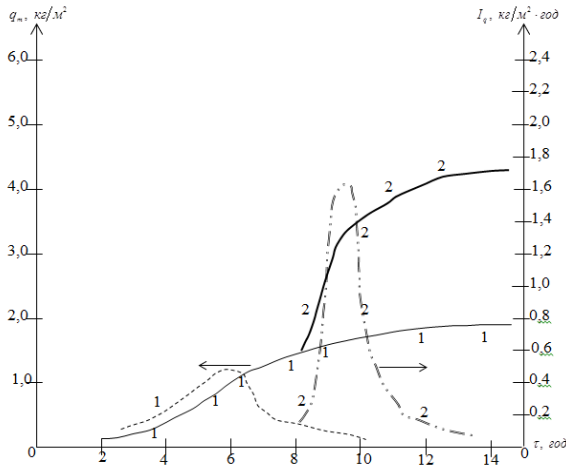


Рис. 1. Зміна випаровування вологи ( $q_m$ ) та інтенсивності ( $I_q$ ) її випаровування за звичайного пропарювання (1) й комбінованої ТВО (2): бетон,  $V/T=0,097$ .

Для аналізу процесу термообробки у зв'язку з уточненням режимів комбінованої ТВО були проведені [4] розрахунки критерію Кирпичова  $K_{im}$ . На рис. 2 видно, що при звичайному пропарюванні крива  $K_{im} = f(\tau)$  після 8-10 годин починає спадати. Після початку сушки критерій Кирпичова різко зростає за рахунок збільшення інтенсивності випаровування вологи з матеріалу. Після 13 годин сушку можна закінчувати, оскільки інтенсивність випаровування різко знижується й відповідно відбувається зменшення  $K_{im}$ .

З робіт О.В.Ликова [1,3] відомо, що чим менше  $K_{im}$ , тим меншим є опір внутрішньому переносу речовини.

Як впливає з рис. 2, на стадії ізотермічного прогрівання, коли структура матеріалу вже набула міцності, достатньої для опору напруженням, величина  $K_{im}$  значно збільшується при комбінованій ТВО. Міграція вологи вже ускладнена внаслідок утворення більш щільної структури зі збільшенням об'єму мікрокапілярів й замкненою пористістю, що зменшує небезпеку деформацій та порушень структури.

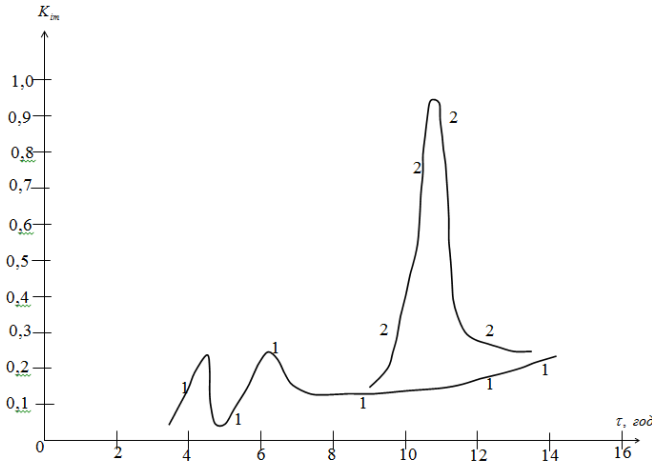


Рис. 2. Зміна критерію Кирпичова  $K_{im}$  у процесі звичайного пропарювання (1) й комбінованої ТВО (2): бетон, В/Т=0,097.

2. Моделювання процесів тепло- й масопереносу при твердінні бетону. Математична модель процесу тепло- й масопереносу подана системою диференціальних рівнянь у частинних похідних другого порядку і має вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vartheta(x,t)}{\partial t} = a_T(t, \vartheta, u) \cdot \frac{\partial^2 \vartheta(x,t)}{\partial x^2} + f(t, \vartheta, u); \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = a_g(t, \vartheta, u) \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - g(t, \vartheta, u), \end{cases} \quad (2)$$

де:  $\vartheta = \vartheta(x,t)$  – температура у градусах ( $^{\circ}\text{C}$ ) точки з координатою  $x$  у момент часу  $t$ ;  $u = u(x,t)$  – поточний вологовміст бетону (у  $\text{кг}/\text{кг}$ );  
 $a_T = a_T(t, \vartheta, u)$  – коефіцієнт температуропровідності,  
 $a_T = 4 \cdot 10^{-3} \cdot [0,5 + (80 - \vartheta)/120]$ ,  $\text{м}^2/\text{год}$ ;  $a_g = a_g(t, \vartheta, u)$  – коефіцієнт дифузії води;  
 $a_g = a_g(u) = 4 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-2} \cdot (u - 0,02)^2$ ,  $\text{м}^2/\text{год}$ ;  
 $f(t, \vartheta, u)$  – функція екзотермії бетону,  
 $f(t, \vartheta, u) = [70 + 20 \cdot (\exp(0,02t) - 1) \cdot \vartheta]^{-1}$ ,  $\text{град}/\text{год}$ ;  $g(t, \vartheta, u)$  – функція, що описує внутрішнє стікання води, тобто кількість води, що

використовується для хімічного зв'язування води при гідратації,  $g(t, \varnothing, u) = 25 \cdot 10^{-5} \cdot \varnothing / [70 + 20 \cdot \{ \exp(0,02t) - 1 \}]$ , кг/кг · год. Чисельні значення параметрів  $a_T, a_g, f, g$ , обрані із урахуванням роботи [9]. Початкові умови подані у вигляді:

$$\begin{cases} \varnothing(0, x)|_{t=0} = \varnothing_0(x) \quad (0 \leq x \leq R); \quad \varnothing_0(x) = 20^\circ \text{C}, \\ u(0, x) = u_0(x), \quad u_0(x) = (0,04 \dots 0,09), \end{cases} \quad (3)$$

де  $\varnothing_0(x)$  – початкова температура,  $u_0(x)$  – початковий вологовміст,  $R$  товщина виробу, м,  $R = 0,1$  м.

Граничні умови виражаються у залежності від характеру контакту бетону з формооснащенням. Так, для поверхні бетону, що розміщена безпосередньо у площині нагрівання ( $x = R$ ), маємо:

$$\begin{cases} \varnothing(t, x)|_{x=R} = T_R(t), \\ \left. \frac{\partial \varnothing(t, x)}{\partial x} \right|_{x=0} = H_0(\varnothing) \cdot [\varnothing(t, 0) - T_0(t)] + j \cdot \left. \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} \right|_{x=0}. \end{cases}$$

$$T_R(t) = \begin{cases} (20 + 22,5 \cdot t), & 0 \leq t \leq 2; \\ 85, & 2 \leq t \leq 14; \\ (85 - 45 \cdot (t - 14)), & 14 \leq t \leq 15. \end{cases} \quad (4)$$

Тут  $T_0(t)$ ,  $T_R(t)$  – температура поверхонь бетонного виробу відповідно при  $x = 0$  й  $x = R$ ;  $H_0(\varnothing)$  – відносний коефіцієнт теплопередачі,

$$H_0(\varnothing) = [4 + (\varnothing - 20)^2 / 360] \text{ м}^{-1} \quad [9];$$

$H_0(\varnothing) = \alpha_{HT}(\varnothing) / \lambda$ ;  $\alpha_{HT}(\varnothing)$  – коефіцієнт теплопередачі (у  $\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{год}$ );  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності (у

$\text{Ккал} / (\text{м} \cdot \text{град} \cdot \text{год})$ );  $\varnothing(t, 0)$  – температура на поверхні стінки з

координатою  $x$  у момент часу  $t$ ;  $j = \gamma \cdot a_b \cdot r / \lambda$ ;  $\gamma$  – щільність бетону

( $\gamma \approx 2400 \text{ кг} / \text{м}^3$ );  $r$  – питома теплота випаровування вологи включно з

теплотою змочування ( $r \approx 539 \text{ Ккал} / \text{кг}$ ).

Для поверхні бетону, яка прилягає до металооснащення, граничні умови подані у виді:

$$\left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = P_0(u) \cdot [u(t,x)]_{x=0} - B_0(t);$$

$$\left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right|_{x=R} = -P_R(u) \cdot [u(t,x)]_{x=R} - B_R(t),$$
(5)

де  $B_0(t), B_R(t)$  – врівноважений вологовміст (у кг/кг), відповідно при  $x = 0$  й  $x = R$ ;  $P_0(u) = P_R(u) = P = \alpha_{HB}(u)$ :  $a_b$  – відносний коефіцієнт вологопередачі;  $\alpha_{HB}(u)$  – коефіцієнт вологопередачі,  $\alpha_{HB}(u) = 10^{-4} + 0,5 \cdot (u - 0,02)^2, \text{ м}^2/\text{год}$  [9].

При моделюванні було прийнято, що температура бетону змінюється від 20 до 80 °C. Для розв'язування системи рівнянь (2) використовується апроксимація з наявною схемою дискретизації, що забезпечує отримання стійкої різницевої схеми [12]. Розв'язок системи (2) здійснювався методом прогонки, а оскільки система зв'язана, тоді прогонка є матричною [12, 13]. У процесі моделювання прийнято, що крок по часу  $\tau = 0,01 \text{ год}$ , а крок по координаті  $h = R/N = 0,01 \text{ м}$ , де  $N$  – число вузлів мінус одиниця,  $N = 10$ . Крім того, приймається, що:

$\varnothing(nh, m\tau) = \varnothing_n^m$  й  $u(nh, m\tau) = u_n^m$ . Із урахуванням викладеного вище скінчено-різницева схема системи рівнянь записується у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\varnothing_n^{m+1} - \varnothing_n^m}{\tau} = a_T(m\tau, \varnothing_n^m, u_n^m) \cdot \left\{ \varnothing_{n+1}^{m+1} - 2 \cdot \varnothing_n^{m+1} + \varnothing_{n-1}^{m+1} \right\} + \\ + f(m\tau, \varnothing_n^m, u_n^m); \\ \frac{u_n^{m+1} - u_n^m}{\tau} = a_b(m\tau, \varnothing_n^m, u_n^m) \cdot \left\{ \frac{u_{n+1}^{m+1} - 2 \cdot u_n^{m+1} + u_{n-1}^{m+1}}{n^2} \right\} - \\ - g(m\tau, \varnothing_n^m, u_n^m) \quad (n = 1, 2, \dots, N-1; m = 0, 1, 2, \dots) \end{array} \right. \quad (6)$$

Початкові умови записуються наступним чином:

$$\varnothing_n^0 = \varnothing_0(nh), \quad u_n^0 = u_0(nh). \quad (7)$$

Дискретизовані граничні умови для обох випадків виражаються у вигляді:



$$\left\{ \begin{array}{l} \varnothing_N^{m+1} = T_N^{m+1}; \\ \frac{\varnothing_I^{m+1} - \varnothing_0^{m+1}}{h} = H(\varnothing_0^m) \cdot [\varnothing_0^{m+1} - T_0((m+1) \cdot \tau)] + \\ + j \cdot \frac{\{u_I^{m+1} - u_0^{m+1}\}}{h}, \\ \frac{u_I^{m+1} - u_0^{m+1}}{h} = P(u_0^m) \cdot [u_0^{m+1} - B_0], \\ \frac{u_N^{m+1} - u_{N-1}^{m+1}}{h} = P(u_n^m) \cdot [u_{N+1}^m - B_R] \end{array} \right. \quad (8)$$

Система скінчено-різницевих рівнянь зв'язана шляхом використання коефіцієнтів рівнянь та граничної умови, що виражається складовою  $j \cdot (u_I^{m+1} - u_0^{m+1})/h$ . У результаті розв'язку системи диференціальних рівнянь були визначені: інтенсивність випаровування  $u_{\text{вун.}}$  ( $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ), що представлена у виді:

$$u_{\text{вун.}}(m\tau) = \gamma \cdot \left[ a_b(u_0^m) \cdot \frac{(u_1^m - u_0^m)}{h} - a_b(u_N^m) \cdot \frac{(u_N^m - u_{N-1}^m)}{h} \right], \quad (9)$$

й зміна у часі інтенсивності гідратації  $I_{\text{гнм.}}(t)$  ( $\text{у } \%/ \text{год}$ ), котра має вид:

$$I_{\text{гнм.}}(t) = \frac{1}{(N+1)} \cdot \sum_{k=0}^N g(t, \varnothing(t, kh), u(t, kh)), \quad (10)$$

а зміна степені гідратації, що виражає кількість вологи, яка витрачена на гідратацію від початку процесу до певного (поточного) моменту часу ( $\text{у}$  відсотках від початкового вологовмісту) може бути представлена у вигляді:

$$Hu(t) = \frac{1}{u_0} \cdot \int_0^t I_{\text{гнм.}}(t') dt', \quad (11)$$

де:  $u_0$  – початковий вологовміст бетону ( $\text{кг}/\text{кг}$ ), а також зміна у часі тепловологісної обробки критерію Ребіндера [6, 10], який представляє відношення кількості тепла, що витрачається на нагрівання виробу

$Q_{нагр.}(t)$ , до кількості тепла, яке витрачається на випаровування  $Q_{вип.}(t) = r \cdot u_{вип.}(t)$  у певний момент часу, тобто:

$$R_b(t) = Q_{нагр.}(t) / Q_{вип.}(t), \quad (12)$$

де:

$$Q_{нагр.}(t) = \gamma \cdot c \cdot \left[ a_T(\varnothing_N^m) \cdot \frac{(\varnothing_N^m - \varnothing_{N-1}^m)}{h} - a_T(\varnothing_0^m) \cdot \frac{(\varnothing_1^m - \varnothing_0^m)}{h} \right], \quad (13)$$

$c$  – питома теплоємність,  $Kкал/(кг \cdot град.)$ , ( $c \approx 0,25 Kкал/(кг \cdot град.)$ ).

Аналіз результатів досліджень показує, що при наближенні до поверхні нагрівання температура бетону зростає, причому зі збільшенням часу термообробки температура у кожному прошарку бетону збільшується. Крім того, через три години після початку термообробки градієнт температури по товщині плити біля поверхні підігріву досягає максимального значення, що у 2,5 рази перевищує значення при усталеному процесі (через п'ять годин).

Дослідження показують, що у центрі плити ( $x=0,05м$ ) вологовміст має максимальне значення, причому з наближенням до бічних поверхонь він зменшується. Протягом п'яти годин від початку термообробки зміна вологовмісту на обох бічних поверхнях виробу досягає у середньому 3%. Крім того, зміна вологовмісту на граничних поверхнях відбувається більш інтенсивно. Максимальне значення градієнту вологовмісту по товщині плити досягається на бічних поверхнях. За час термообробки зміна градієнту вологовмісту є незначною й зменшується лише по товщині бетонного виробу, причому у центрі виробу змін немає. Необхідно також зазначити, що вологовміст у процесі термообробки зменшується, причому його значення у центрі й на обох поверхнях бетонного виробу є різним. Значення вологовмісту на бічних поверхнях у середньому на 2% менше, ніж у центрі виробу. На рисунку 3 подані зміни інтенсивності випаровування (1), інтенсивності гідратації (2) й степені гідратації бетону (3) у процесі тепловологісної обробки. Аналіз результатів досліджень показує, що у процесі термообробки інтенсивність випаровування зменшується. Протягом чотирьох годин від початку тепловологісної обробки інтенсивність гідратації зростає, потім до дев'яти годин практично не змінюється й у подальшому зменшується. Степінь гідратації до однієї години від початку термообробки лінійно зростає й у подальшому збільшується до чотирнадцяти годин, а потім степінь гідратації зменшується. На рисунку 4 подана зміна у часі критерію Ребіндера.

Дослідження показали, що протягом двох годин від початку тепловологісної обробки критерій Ребіндера зростає, що свідчить про великі витрати тепла на нагрівання виробу, причому більші, ніж на випаровування. У подальшому тепло витрачається у основному на випаровування вологи з бетонного виробу, який стає твердим.

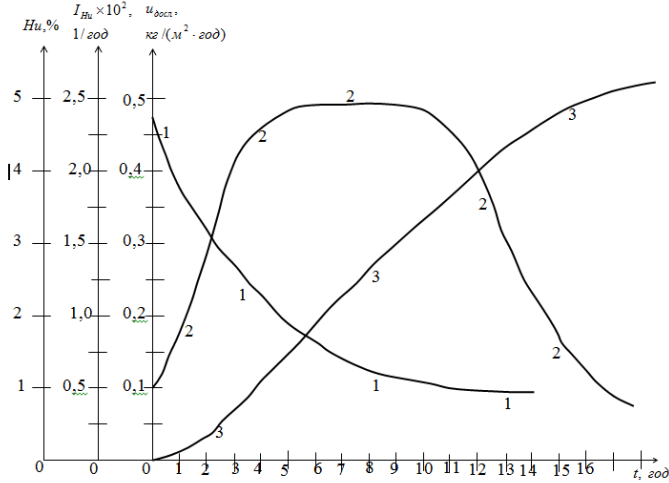


Рис. 3. Зміни інтенсивності випаровування (1), інтенсивності гідратації (2) й ступені гідратації бетону (3) у процесі термовологісної обробки.

Експериментальні дослідження кінетики твердіння бетону проводились із використанням ультразвукових приладів для контролю процесу структуроутворення [15] й термодатчиків – для вивчення зміни температури досліджуваного середовища.

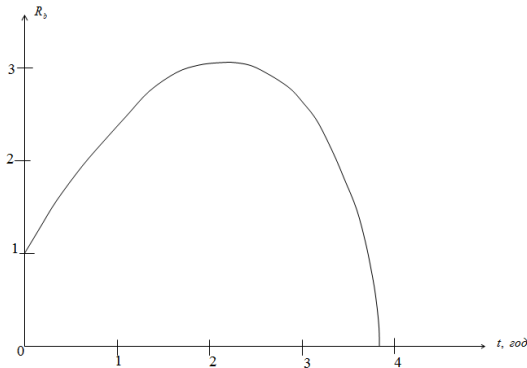


Рис. 4. Зміна у часі критерію Ребіндера

Наступні експерименти проводились на оптимальних режимах термообробки для прийнятих складів бетонної суміші, отриманих у результаті застосування методу планування експерименту. Результати виконаних досліджень співставлені з даними, отриманими при моделюванні процесу твердіння бетону за обраних граничних умов.

**Висновки.** 1. Обґрунтовані фізико-механічна та математична моделі процесів масообміну, тепло- й масопереносу при інтенсивному зневодненні та твердінні капілярно-пористих тіл, як моделей бетонних виробів. При цьому використані критерії Кирпичова та Ребіндера. 2. Аналіз обробки експериментальних даних та їх співставлення з результатами чисельних/аналітичних рішень математичних моделей показують можливість їх застосування у подальшому для опису процесів тепло- і масопереносу, масообміну у бетонних виробках, які створюються за стандартами існуючих технологій виготовлення.

## REFERENCES

1. Lykov A.V. Yavleniya perenosa v kapilyarno-poristyyh telah. M.: Gostehizdat, 1954. 296 s. {in Russian}.
2. Romanovskij S.G. Processy termicheskoy obrabotki vlaznykh materialov. M.: Energiya, 1976. 328 s. {in Russian}.
3. Lykov A.V. Teoriya sushki. M.: Energiya, 1968. 471 s. {in Russian}.
4. Klyuevskij B.V., Shtakelberg D.I. Massoobmen i massoperenos v processe intensivnogo obezvozhvaniya betona. Tehnologicheskaya mehanika betona. Ryga: RPY, 1983. S. 133-136. {in Russian}.
5. Zasedatelev I.B., Petrov-Denisov V.G. Teplo- i massoperenos v betone specialnykh promyshlennykh sooruzhenij. M.: Strojizdat, 1973. 167 s. {in Russian}.
6. Volosyan L.Ya. Teplo- i massooben pri termoobrabotke betonnykh i zhelezobetonnykh izdelij. Minsk: Nauka i tehnika, 1973. 255 s. {in Russian}.
7. Raschet s pomoshyu EVM temperaturnyh i vlazhnostnyh polej deformaci i napryazhenij, vznikayushih pri teplovlazhnostnoj obrabotke na stadii ostyvaniya betonnykh izdelij. – V kn.: Teplo- i massoperenos pri novykh sposobah teplovogo vozdejstviya na tverdeyushij beton / K.E. Goryainov, A.N. Schastnyj, A.V. Nehoroshev i dr. K.: Budivelnik, 1973. S. 131-134. {in Ukrainian}.
8. Malunina L.A. Teplovlazhnostnaya obrabotka tyazhelogo betona. M.: Strojizdat, 1977. 159 s. {in Russian}.
9. Aleksandrovskij S.V. Raschet betonnykh i zhelezobetonnykh konstrukcij na temperaturne i vlazhnostnie vozdejstviya (s uctom polzuchesti). M.: Strojizdat, 1966. 443 s. {in Russian}.
10. Lykov A.V. O sistemah diferencialnykh uravnenij teplomassopernosa v kapilyarno-poristyyh telah. Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 1974. T.26,№1. C. 369-376. {in Russian}.
11. Dmitrovich A.D. Teplo i massoperenos pri tverdenii betona v parovoj srede. M.: Strojizdat, 1967. 243 s. {in Russian}.

12. Grishko I.M., Lishanskij B.A., Vedenskij V.N. Issdedovanie processov teplo- i massoperenosa pri tverdenii betona. Tehnologicheskaya mehanika betona. Riga: RPI, 1984. S.53-61. {in Russian}.
13. Samarskij A.A. Teoriya raznosnyh shem. M.: Nauka, 1977. 656 s. {in Russian}.
14. Godunov S.K., Ryabenskij V.S. Raznosnye shemy. M.: Nauka, 1977. 439 s. {in Russian}.
15. Dzenis V.V., Lapsa V.H. Ulrazvukovoj kontrol tverdeyushhego betona. L.: Strojizdat, 1971. 112 s. {in Russian}.

### **Список літератури.**

1. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехиздат, 1954. 296 с.
2. Романовский С.Г. Процессы термической обработки влажных материалов. М.: Энергия, 1976. 328 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 471 с.
4. Ключевский Б.В., Штакельберг Д.И. Массообмен и массоперенос в процессе интенсивного обезвоживания бетона. Технологическая механика бетона. Рига: РПИ, 1983. С. 133-136.
5. Заседателев И.Б., Петров-Денисов В.Г. Тепло- и массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений. М.: Стройиздат, 1973. 167 с.
6. Волосян Л.Я. Тепло- и массообмен при термообработке бетонных и железобетонных изделий. Минск: Наука и техника, 1973. 255 с.
7. Расчет с помощью ЭВМ температурных и влажностных полей деформации напряжений, возникающих при тепло-влажностной обработке на стадии остывания бетонных изделий. – В кн.: Тепло- и массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон / К.Е. Горайнов, А.Н. Счастный, А.В. Нехорошев и др. К.: Будівельник, 1973. С. 131-134.
8. Малунина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. М.: Стройиздат, 1977. 159 с.
9. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учётом ползучести). М.: Стройиздат, 1966. 443 с.
10. Лыков А.В. О системах дифференциальных уравнений тепло-массопереноса в капиллярно-пористых телах. Инженерно-физический журнал. 1974. Т.26, №1. С. 369-376.
11. Дмитриевич А.Д. Тепло- и массоперенос при твердении бетона в паровой среде. М.: Стройиздат, 1967. 243 с.
12. Гришко И.М., Лишанский Б.А., Веденский В.Н. Исследование процессов тепло- и массопереноса при твердении бетона. Технологическая механика бетона. Рига: РПИ, 1984. С.53-61.
13. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
14. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1977. 439 с.
15. Дзенис В.В., Лапса В.Х. Ультразвуковой контроль твердеющего бетона. Л.: Стройиздат, 1971. 112 с.

## ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ

### PARAMETERS OF THE MODEL FOR FORECASTING CALCULATED CHARACTERISTICS OF TRAFFIC FLOW ON AUTOMOBILE ROADS

**Ярещенко Н.В., к.т.н., доц. (Харківський національний  
автомобільно-дорожній університет)**

**Yareshchenko N.V., Ph.D., Associate Professor, (Kharkiv National  
Automobile and Road University)**

*У міру розвитку транспорту накопичувався досвід забезпечення безпеки, зручності дорожнього руху на автомобільних дорогах засобами організації дорожнього руху. Так буде і далі, продовжуватися, відповідно до розвитку техніки і технології, а також дорожнього будівництва.*

*Дослідження параметрів моделі прогнозування розрахункових характеристик транспортного потоку допоможе в підвищенні безпеки руху на автомобільних дорогах.*

*The article examines the parameters of the model for forecasting the calculated characteristics of traffic flow on automobile roads.*

*With the development of motorization for decades, the world has accumulated experience in ensuring the safety, efficiency and convenience of road traffic in cities and on highways by methods of traffic management with the use of appropriate technical means. This process will continue further as well as road construction.*

*Scientific research and practical engineering activities in the field of traffic management have made it possible to accumulate a wide range of requirements for road construction and specific engineering solutions that make it possible to obtain the desired effect during the mass movement of vehicles.*

*All developments of various methods of movement organization have a close relationship and even interpenetration.*

*In domestic practice, there is a lack of attention from traffic organizers and employees of road maintenance services to the creation of all the necessary conditions for traffic safety.*

*The possibility of creating a uniform traffic flow on the traffic lane and roadway as a whole has an independent value, it reduces the conflict of the flow and facilitates the task of optimizing the speed mode of traffic. At the same time, speed optimization is very diverse, and therefore it should be singled out as an independent direction.*

*The need to eliminate the unsatisfactory technical condition of roads as a preliminary stage in the implementation of traffic management measures remains a primary task in the practice of traffic management. Without an examination of road conditions and the elimination of identified deficiencies, it is impossible to start*

*implementing developments to improve the organization of traffic, since the most progressive solutions cannot be effective in the case of unsatisfactory road conditions*

*The conducted research made it possible to propose the application of the methodology of analyzing the parameters of the model for forecasting the calculated characteristics of traffic flow on highways, which are the initial and final values of traffic speed, intensity, and load.*

*This allowed the author to assume that determining the parameters of the model for predicting the calculated characteristics of traffic flow on highways, roads, and other causes and factors that have a significant impact on the increase in the number of road transport adventures is an important task for researching on improving traffic safety.*

*Ключові слова: система, автомобільна дорога, автомобіль, математична модель, розрахункові характеристики, система.*

*Keywords: system, automobile, mathematical model, system, calculated characteristics, highway*

Дослідження в області організації руху дозволили накопичити комплекс вимог до дорожнього будівництва, що дозволяють отримати бажаний ефект за масового руху транспортних засобів.

Усі розробки різних методів організації руху мають тісний взаємозв'язок і навіть взаємопроникнення.

У вітчизняній практиці є недолік уваги організаторів дорожнього руху і працівників дорожньо-експлуатаційних служб до створення всіх необхідних умов для безпеки руху [1].

Створення за можливістю однорідного транспортного потоку на смузі руху та проїжджій частини в цілому має самостійне, значення зменшує конфліктність потоку і полегшує завдання оптимізації швидкісного режиму руху. Разом з тим оптимізація швидкостей дуже різнопланова, і тому її слід виділити як самостійний напрям.

Необхідність ліквідації незадовільного технічного стану доріг як попереднього етапу при впровадженні заходів з організації руху залишається першорядним завданням в практиці організації дорожнього руху. Без обстеження дорожніх умов та усунення виявлених недоліків приступати до реалізації розробок з удосконалення організації руху не можна, так як найпрогресивніші рішення не можуть дати ефекту у разі незадовільного стану доріг [2].

Характеристиками транспортного потоку є:

- швидкість руху
- інтенсивність руху;
- щільність потоку.

Така характеристика як швидкість руху використовується для розрахунків характеристики руху одиничного автомобіля або параметрів

геометричних елементів доріг (плану, поперечного і подовжного профілів тощо).

Під час розгляду основного змісту інженерної діяльності з організації дорожнього руху необхідно оцінювати кількісними показниками результати впроваджуваних заходів. При цьому відзначається особлива важливість застосування методу порівняння показників "до і після". Це викликано різноманітністю конкретних умов руху, у зв'язку з чим неможливо встановити абсолютні значення оціночних критеріїв і слід аналізувати зміни показників, що відбуваються в результаті вдосконалення організації руху впровадженням окремих та комплексних заходів на даній ділянці дороги або у відповідному регіоні.

Оцінка рівня безпеки базується в основному на показниках статистики дорожньо-транспортних пригод і на характеристиці конфліктних точок та конфліктних ситуацій на розглянутих елементах дороги. Вдосконалення застосовуваних методів і апаратури сприяє появі нових методичних прийомів, а також приладового забезпечення оцінки впроваджених рішень. [3]

Для оцінки швидкісних показників транспортного потоку можуть бути використані такі критерії як миттєва швидкість у характерному перерізі дороги, швидкість сполучення на певній ділянці маршруту, частота і тривалість затримок транспортних засобів, ступінь рівномірності швидкісного режиму. Найбільш показовою характеристикою є швидкість сполучення, яка обернено пропорційна витратам часу на пересування транспортних засобів по дорозі. Середні витрати часу на рух вимірюють у хвилинах, витрачених на проїзд 1 км досліджуваного маршруту. [4]

Праці вітчизняних і зарубіжних дослідників показують, що умови безпеки, а також витрата палива значною мірою залежать від стабільності швидкісного режиму протягом маршруту. Чим більша частота і діапазон коливань (дисперсія) швидкості автомобілів під час проїзду по магістралі, тим нижче відносний рівень безпеки руху та паливна економічність.

Параметрами моделі прогнозування розрахункових характеристик транспортного потоку на автомобільних дорогах є початкові та кінцеві значення швидкості руху, інтенсивності та навантаження відповідно.

Початкова швидкість руху для автомобіля може бути визначена через індивідуальну норму швидкості на дорозі, відповідних до початкового часу зміни системи ЛАДС, тобто при  $t=0$ .

Індивідуальна норма швидкості визначається за формулою

$$V_H = V_0 = \frac{V_{нб} * m_{б} + V_{ни} * m_{с}}{m_{б} + m_{с}}; \quad (1)$$

де  $V_H$  - індивідуальна норма швидкості;  
 $V_0$  - початкова швидкість руху;



$V_{н6}$ ,  $V_{нш}$  - функціональні норми швидкостей руху для мотивів безпеки та свободи дії водія відповідно;

$m_6$ ,  $m_c$  - жорсткості (коефіцієнти ваги) норми  $V_{н6}$  та  $V_{нш}$ , відповідно.

Для транспортного потоку початкова швидкість визначається як групова норма швидкості

$$V_{ГН} = V_{Г0} = \sum_{i=1}^I V_{Hi} d_i; \quad (2)$$

де  $V_{Г0}$  - початкова швидкість руху транспортного потоку;

$V_{ГН}$  - групова норма швидкості руху;

$V_{Hi}$  - індивідуальна норма швидкості руху  $i$ -того автомобіля в транспортному потоці;

$d_i$  - доля автомобілів  $i$ -того типу в транспортному потоці;

$I$  - число автомобілів в транспортному потоці (групі).

Норма швидкості руху  $V_{ГН}$  може розглядатися як початкова лише для даних дорожніх умов, для даної дороги. В мережі доріг, в якості початкової можна використовувати соціальну норму швидкості руху, яку визначають за формулою

$$V_{CH} = V_{C0} = \sum_{m=1}^M V_{ГHm} d_m; \quad (3)$$

де  $V_{C0}$  - початкова швидкість руху на мережі доріг;

$V_{CH}$  - соціальна норма швидкості руху;

$V_{ГHm}$  - групова норма швидкості руху транспортного потоку на  $m$ -тої дорозі;

$M$  - число доріг в транспортній мережі.

$d_m$  - доля доріг  $m$ -того типу в структурі мережі доріг, що розглядається.

Дослідження Гаврилова Е.В. [5] показують, що для водія по психічному примусу та надійності його діяльності є швидкість, яка дорівнює  $V_{нш}$ .

Індивідуальна норма швидкості руху  $V_n$  прагне до функціональної норми  $V_{нш}$ .

Кінцева групова норма швидкості визначається як

$$V_{ЗГ} = V_{ГН} = \sum_{i=1}^I V_{Hшi} d_i; \quad (4)$$

Відповідно кінцева соціальна норма швидкості буде дорівнювати

$$V_{3C} = V_{CH} = \sum_{m=1}^M V_{3\Gamma m} d_m; \quad (5)$$

Параметри моделі прогнозування швидкостей руху, які розглядаються, дозволяють представити цю модель у вигляді:

- для одинокого автомобіля

$$V(t) = V_{H0}(1 - P_r) + V_{HШ} P_r; \quad (6)$$

- для транспортного потоку

$$V(t) = V_{ГH0}(1 - P_r) + P_r \sum_{i=1}^I V_{HШi} d_i; \quad (7)$$

- для мережі доріг

$$V(t) = V_{CH0}(1 - P_r) + P_r \sum_{m=1}^M V_{3\Gamma m} d_m; \quad (8)$$

Прогноз фактичних швидкостей руху на автомобільних дорогах

$W_{ni}$  - норма продуктивності  $i$ -го водія;

$W_{Гn}$  - групова норма продуктивності;

$m_i$  - жорсткість норми  $W_{ni}$ .

Рішення задачі оптимізації будемо здійснювати методом невизначених коефіцієнтів Лагранжа. [6]

Умови наявності екстремуму

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial W_{ni}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I 2m_i (W_{ni} - W_{ni}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I 2m_i (W_{ni} - W_{Гn}) + \lambda I = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^I W_{ni} - R = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Підстановка в друге рівняння з системи (9) дає

$$\sum_{i=1}^n \left[ \frac{W_{ni} - W_{Гn}}{2} - \frac{\lambda}{2m_i} \right] - R = 0. \quad (10)$$

Додавши позначення  $\sum_{i=1}^I \frac{1}{m_i} = S$  отримаємо

$$\lambda = \frac{2}{S} \sum_{i=1}^I \frac{W_{\text{ні}} - W_{\text{гн}}}{2} - \frac{2}{S} R. \quad (11)$$

Підстановка дає оптимальне значення необхідної продуктивності діяльності у вигляді

$$\tilde{W}_{\text{ні}} = \frac{W_{\text{ні}} + W_{\text{гн}}}{2} + \frac{1}{m_i S} \left[ R - \sum_{i=1}^I \frac{W_{\text{ні}} + W_{\text{гн}}}{2} \right]. \quad (12)$$

Так як  $W=VP_v$ , то необхідна швидкість руху при заданій надійності діяльності водія визначається за формулою

$$\tilde{V}_{\text{пі}} = \frac{V_{\text{ні}} + V_{\text{гн}}}{2} + \frac{1}{m_i S} \left[ R_1 - \sum_{i=1}^I \frac{V_{\text{ні}} + V_{\text{гн}}}{2} \right], \quad (13)$$

$$\text{де } R_1 = \sum_{i=1}^I V_{\text{пі}}.$$

Формула (13) може використовуватися для прогнозування суспільно необхідної швидкості руху  $i$ -го водія транспортного потоку. При цьому параметри моделі прогнозування визначаються наступним чином:

початкова швидкість

$$\tilde{V}_{\text{пі0}} = \frac{V_{\text{ноі}} + V_{\text{гно}}}{2} + \frac{1}{m_i S} \left[ R_1 - \sum_{i=1}^I \frac{V_{\text{ноі}} + V_{\text{гно}}}{2} \right] \quad (14)$$

Кінцева швидкість

$$\tilde{V}_{\text{піз}} = \frac{V_{\text{нсі}} + \sum_{i=1}^I V_{\text{нсі}} di}{2} + \frac{1}{m_i S} \left[ R_1 - \sum_{i=1}^I \frac{V_{\text{нсі}} + \sum_{i=1}^I V_{\text{нсі}} di}{2} \right]. \quad (15)$$

А модель прогнозування суспільно необхідної швидкості руху  $i$ -го водія перетвориться до вигляду

$$\tilde{V}_{\text{пі}}(t) = \tilde{V}_{\text{піо}}(1 - P_z) + \tilde{V}_{\text{піз}}P_z \quad (16)$$

Методи моделювання засновані на використанні математичних моделей зміни параметрів транспортних потоків.

За результатами дослідження доведено, що математична модель, яка описує взаємозв'язок між інтенсивністю, швидкістю та щільністю потоку є основним рівнянням транспортного потоку.

Будь-який фактор, що негативно впливає на транспортний потік буде підвищувати ризик дорожньо-транспортних пригод. Це дозволило припустити, що визначення параметрів моделі прогнозування розрахункових характеристик транспортного потоку на автомобільних дорогах, дорожніх та інших причин та чинників, які мають значний вплив на збільшення кількості аварійності, є важливим завданням для проведення досліджень щодо підвищення безпеки руху.

### References

1. Gavrilov E.V., Dmutrichenko M.F., Sistemologiya na transporti. Organizaciya doroznogo ruju. Vud-vo Znanny Ukrainu.2007. 450 s.
2. Polischuk V.P., Dzuba O.P. Teoraya transportnogo potoku. Metodu I modeli organizacii doroznogo ruju. Vud-vo Znanny Ukrainu. 2008. 175 s.
3. Derej Z.D., Zavorutskiy U.E. Nebezpechni situacii na dorozni, yk ij uniknutu. Praktuchni poradu vodiyam. Vud-vo Aruy, 2017. 72 s.
4. Sobko V.M., Sidun U.V., Karasiova K.O. Proektuvania avtomobilnuch dorig. Lvivska politechnica, 2019. 228 s.
5. Gavrilov E. V., Gridin A.M., Rypujin V.M. Sistemne proektuvania avtomobilnij dorig. Vid. ASB. 1998. 138 s.
6. Klepenko V.U., Golez V.L. Vischa matemetika v prikkladaj I zadachaj. Navchalniy posibnik. Vidavniztvo Zentr uchbovoy literature. 2021. 594 s.

### Література

1. Гаврилов Е.В., Дмитриченко М.Ф. Системология на транспорті. Організація дорожнього руху. Вид-во Знання України, 2007. -450 с.
2. Поліщук В.П., Дзюба О.П. Теорія транспортного потоку. Методи і моделі організації дорожнього руху. Вид-во Знання України. 2008. 175 с.
3. Дерех З.Д., Заворицький Ю.С. Небезпечні ситуації на дорозі, як їх уникнути. Практичні поради водіям. Вид-во Арий, 2017. 72 с.
4. Собко Ю.М., Сідун Ю.В., Карасьова Л.О. Проектування автомобільних доріг. Львівська політехніка, 2019. 228 с.
5. Гаврилов Е.В., Грідін А.М., Ряпухін В.М. Системне проектування автомобільних доріг. Вид. АСБ, 1998 р. 138 с.
6. Клепенко В.Ю., Голець В.Л. Вища математика в прикладах і задачах. Навчальний посібник. Видавництво Центр учбової літератури. 2021. 594 с.

## ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК

### ESTIMATION OF MODEL PARAMETERS FOR FORECASTING DESIGN CHARACTERISTICS

**Ярещенко Н.В., к.т.н., доц. (Харківський національний автомобільно-дорожній університет)**

**Yareshchenko N.V., Ph.D., Associate Professor (Kharkiv National Automobile and Road University)**

*У дослідженнях дорожнього руху існує багато методів, що вимагають застосування сучасної електронної апаратури і рухомих лабораторій. Пропонується оцінка параметрів моделі прогнозування розрахункових характеристик, яка показує, що в процесі еволюції автомобільних доріг розрахункові характеристики транспортного потоку на автомобільних дорогах наближаються до функціональної норми розрахункових характеристик транспортного потоку для мотиву свободи дії водія.*

*In the domestic and foreign practice of traffic research, many methods are known, starting from the simplest, which can be performed by a person without special equipment, and ending with complex and time-consuming ones that require the use of modern electronic equipment and mobile laboratories. The variety of methods is by a large number of tasks that are solved with the help of movement organization and conditions, and on the other hand, by constant improvement. Radical changes in the methods of researching traffic parameters and their use are introduced by automated systems. They allow automatic collection and processing of extensive information about the state of traffic flows. However, even in the territories served by automated systems, simpler methods of research focused on the participation of a person - an observer, are needed. Field studies consist of recording specific conditions and indicators of road traffic that occurs during a given period. This group of methods is currently the most common and is characterized by great diversity. Field studies are the existing traffic and pedestrian flows. Modeling of traffic processes is based on the use of mathematical methods to describe traffic flow. At the same time, deterministic or stochastic models can be used. Deterministic models are built based on average values obtained from field studies and are simpler. Stochastic models are built taking into account the random distribution of indicators that characterize individual elements of the accepted mathematical description of the traffic process and can provide a more objective reproduction of various fragments of traffic, in particular, taking into account the behavior of drivers. The evaluation of the calculated characteristics on experimental road sections was carried out on experimental road sections. The speed of movement on the experimental sections was estimated based on the results of experimental runs of the*

running laboratory. Analysis of the experimental results shows that as roads improve and their quality level increases, the individual speed limit and functional speed norm for the traffic safety motive strive for a functional speed norm for the driver's freedom of action motive. As the level of road quality increases, the range of homeostatic regulation of the driver's functional behavior increases. This expands the driver's functional adaptation to driving conditions. In the process of improving roads and their evolution, the actual speeds of cars on these roads are approaching the functional speed norm for the driver's freedom of action motive.

*Ключові слова:* розрахункові характеристики, математична модель, автомобіль, система, автомобільна дорога.

*Keywords:* calculated characteristics, automobile, highway, mathematical model, system.

Оцінка розрахункових характеристик [1, 2] на дослідних ділянках автомобільної дороги проводилася на дослідних ділянках доріг Київ-Харків, табл.1. Дослідні ділянки розташовувалися на рівній місцевості. Висота насипу та виїмок не перевищувала 1,5 м. Коефіцієнт щеплення автомобільного колеса з сухим покриттям при швидкості  $V = 40$  км/г знаходився в межах від 0,71 до 0,75. Покриття асфальтобетонне.

Оцінка швидкостей руху на дослідних ділянках проводилася за результатами дослідних заїздів ходової лабораторії. Реєстрація фактичних швидкостей руху відбувалася за допомогою інформаційно-вимірального комплексу, встановленого на ходовій лабораторії як бортове обладнання.

Для реєстрації швидкості використовувався індукційний датчик, який складається з котушки, сталюого сердечника та постійного магніту. Котушка зі сталюим сердечником прикріплювалася на опорному диску, постійний магніт - на гальмівному барабані правого переднього колеса ходової лабораторії.

При обертанні гальмівного барабану з постійним магнітом в котушці наводиться е.р.с. електроіндукції. Кожному повороту колеса на 360 градусів відповідає один імпульс е.р.с., який реєструється за допомогою ІВК. Переведення числа імпульсів в одиницю часу в швидкість руху відбувається за результатами попереднього тарування.

Оцінка функціональних норм швидкостей руху відбувалася по методу деформації цільової установки Е.В. Гаврилова [3].

Згідно з цим методом, водію ходової лабораторії була надана інструкція (формувався цільова установка) відтворити рух по розрахунковій ділянці з заданою швидкістю  $V_3$  (20, 40, 60, 80, 100 км/год. і т.д.).

Таблиця 1

Характеристики дослідних ділянок

Дорога та положення дослідної ділянки	Категорія дороги	Ширина проїзної частини, м	Число смуг руху	Ширина роздільної смуги, м	Ширина смуги з краю, м	Ширина узбіччя без смуги з краю, м	Інтенсивність руху, авт/г	Склад транспортного потоку
Клів-Харків, км 20-30	I а	22,5	6	6	0,75	3,75	215	змішаний
Клів-Харків, км 45-54	I б	15,0	4	5	0,75	3,75	200	змішаний

Деформація цільової установки оцінювалася за величиною відхилення фактичної швидкості від заданої. При цьому окремо реєструвалися позитивні  $\Delta V_+$  і негативні  $\Delta V_-$  відхилення, як середнє арифметичне для кожного кілометра дослідної ділянки. Позитивне відхилення використовувалося для індикації сили мотиву свободи дій водія, а негативне - для індикації сили мотиву безпеки руху. Задана швидкість руху, при якій позитивне відхилення фактичної швидкості від заданої звертається в нуль, приймалося за функціональну норму швидкості  $V_{H2}$  для мотиву свободи дій водія.

У свою чергу, задана швидкість руху, при якій негативне відхилення фактичної швидкості від заданої звертається в нуль, приймалося за функціональну норму швидкості  $V_{H1}$  для мотиву безпеки руху, рис. 1.

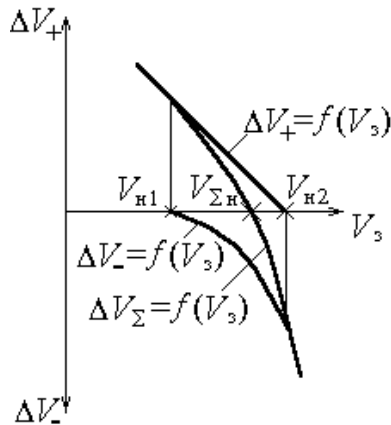


Рис. 1 Розрахункова схема

Задана швидкість руху, при якій сумарне відхилення фактичної швидкості від заданої звертається в нуль, приймалося за індивідуальну норму швидкості руху  $V_{\Sigma H}$  (функціональна норма швидкості для мотивації діяльності) для даного водія в даних дорожніх умовах.

Ймовірності дії мотивів свободи керуючих дій водія та безпеки руху оцінювалися за величинами частот позитивного  $P_+$  та негативного  $P_-$  відхилення фактичної швидкості руху від заданої. Задана швидкість руху, при якій ймовірність дії мотиву безпеки руху  $P_-$  дорівнює одиниці приймалося за гранично допустиму швидкість  $V_{\Pi}$  в даних дорожніх умовах [4].

Результати дослідів за оцінками функціональних норм швидкостей руху представлені на рис. 2, 3, 4.



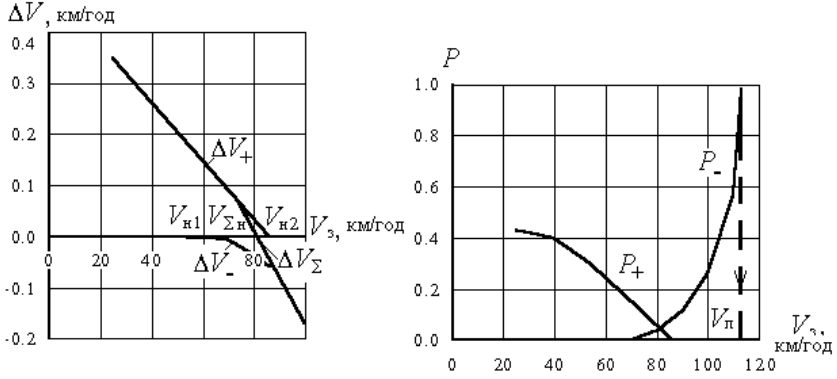


Рис. 2 Сила (а) и частота (б) дій мотивів діяльності водія при русі по дорозі Київ-Харків, км 45-51

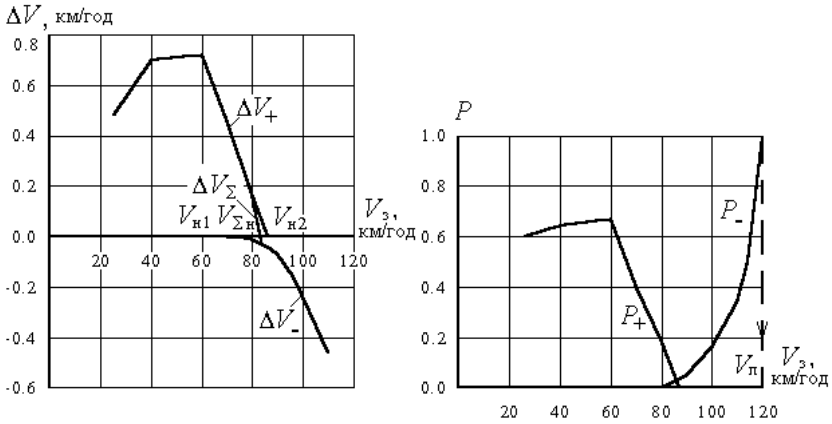


Рис. 3 Сила (а) и частота (б) дій мотивів діяльності водія при русі по дорозі Київ-Харків, км 20-30

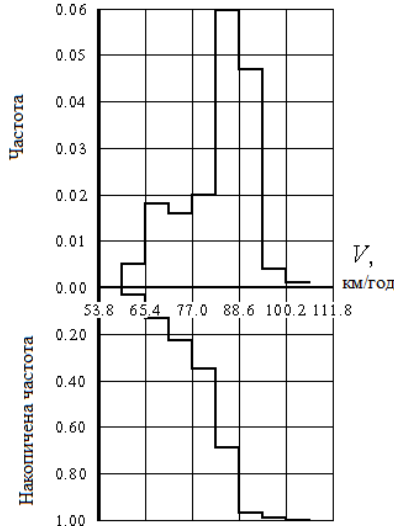


Рис. 4 Гістограма розподілу швидкостей руху мікроавтобусів в нерегламентованому режимі на дорозі Київ-Харків.

Аналіз результатів дослідів показує, що по мірі удосконалення доріг, підвищення рівня їх якості, індивідуальна норма швидкості  $V_{\Sigma H}$  та функціональна норма швидкості для мотиву безпеки руху  $V_{H1}$  буде прагнути до функціональної норми швидкості для мотиву свободи дій водія  $V_{H2}$ , рис.4. Одночасно збільшується різниця між індивідуальною нормою та гранично допустимою швидкістю. Останнє свідчить про те, що з підвищенням рівня якості доріг збільшується діапазон гомеостатичного регулювання функціональної поведінки водія. Це розширює можливості функціональної адаптації водія до умов руху. Вимірювання фактичних швидкостей руху мікроавтобусів в транспортному потоці показало, що найчастіше їх водії обирають для переміщення швидкості, близькі до індивідуальних норм швидкостей, рис. 4. Отже, в процесі удосконалення доріг, їх еволюції фактичні швидкості руху автомобілів цими дорогами дійсно наближаються до функціональної норми швидкості для мотиву свободи дій водія.

За результатами досліджень доведено, що в процесі еволюції автомобільних доріг розрахункові характеристики транспортного потоку на автомобільних дорогах наближаються до функціональної норми розрахункових характеристик транспортного потоку для мотиву свободи дій водія.

### **References**

1. Gavrilov E.V., Dmutrichenko M.F. Sistemologiya na transporti. Organizaciya dorozhnogo ruju. Vud-vo Znanny Ukrainu.2007. 450 s.
2. Polischuk V.P., Dzuba O.P. Teoraya transportnogo potoku. Metodu I modeli organizacii dorozhnogo ruju. Vud-vo Znanny Ukrainu. 2008. 175 s.
3. Gavrilov E.V. The model of system men – automobile – outer world evolution. 60 naukovu-technishna ta naukovu-metodishna konferenciya KNARU, , Kharkov 1996.
4. Gavrilov E. V., Gridin A.M., Rypujin V.M. Sistemne proektuvania avtomobilnij dorig. Vid. ASB. 1998. 138 s.

### **Література**

1. Гаврилов Е.В., Дмитриченко М.Ф. Системологія на транспорті. Організація дорожнього руху. Вид-во Знання України, 2007. 450 с.
2. Поліщук В.П., Дзюба О.П. Теорія транспортного потоку. Методи і моделі організації дорожнього руху. Вид-во Знання України. 2008. 175 с.
3. Gavrilov E.V. The model of system men – automobile – outer world evolution. 60-я научно-техническая и научно-методическая конференция ХГАДТУ., Харьков, 1996г.
4. Гаврилов Е.В., Грідін А.М., Ряпухін В.М. Системне проектування автомобільних доріг. Вид. АСБ, 1998 р. 138 с.

## З М І С Т

Ворончак В.І., Ясній О.П., Ясній В.П.	Використання сплавів із пам'яттю форми в конструкціях у сейсмічних регіонах: огляд та перспективи.....	3
Дацюк В.В., Гомон Св.Св., Петренко О.В.	Тривала експлуатація елементів та конструкцій з деревини.....	11
Добрянський І.М., Добрянська Л.О., Ільчук Н.І.	Ідентифікація оптимальних параметрів термообробки пластин локальним нагріванням і охолодженням.....	19
Добрянська Л.О., Добрянський І.М., Ільчук Н.І.	Конвентивний теплообмін при дослідженні процесів термічного розстрікування бетонних зразків за дії лазерного опромінення.....	28
Задорожнікова І.В., Савенко В.І., Ужегова О.А., Ротко С.В., Чапюк О.С.	Визначення марки цегли із застосуванням коефіцієнта переходу.....	37
Кінаш Р., Білозір В., Біденко І.	Деформативність і міцність дрібнозернистого сталефібробетону за осового розтягу.....	45
Kovalskiy V.P., Mingjun G.	Effekt of salt on air voids and permeability coefficient of asphalt mixture under dry-wet cycle.....	63
Мельник Ю.А., Верешко О.В., Мельник О.В., Верешко А.О.	Використання сучасних інформаційних технологій для містобудівних потреб.....	72
Микитенко С.М.	Експериментальні дослідження елементів збірно-монолітного безкапітельно-безбалкового перекриття.....	79

Павліков А.М., Гарькава О.В., Атембеох К.	Визначення несучої здатності косозігнутих балок на основі розрахункового опору залізобетону.....	86
Парфентьева І.О., Степанюк В.О., Ротко С.В.	Містобудівний аналіз історико-архітектурної спадщини міста Берестечко.....	99
Ротко С.В., Ужегова О.А., Талах Л.О., Будда К.О., Артемук Т.С.	Урахування впливу послідовності зведення на напружено-деформований стан конструкцій при автоматизованому проєктуванні будівель і споруд.....	108
Рошук М.М., Гомон Св.Св.	Робота деревини в умовах прісних і морських водних середовищ.....	117
Serdyuk V.R., Kots I.V.	Investigation of changes in high temperature performance of asphalt concrete under ultraviolet radiation.....	127
Сунь Цзянь, Жданюк В.К.	Дослідження впливу добавок катіонного латексу і базальтової фібри на морозостійкість матеріалу зі щебенево-піщаних сумішей із залізистих кварцитів, укріплених цементом.....	135
Уль А.В., Мельник О.В., Мельник Ю.А., Вакулюк Л.А., Резь Р.А.	Дистанційний моніторинг теплового режиму в містах: теоретичні основи.....	144
Фостащенко О.М., Добровольська О.Г., Гондар С.О., Фостащенко Д.О.	Моніторинг та удосконалення проєктних рішень заміни підкранових конструкцій монтажно-збирального цеху промислової будівлі.....	158
Khrystych O.V.	Effekt of deicing agents on the low-temperature performance of asphalt concrete under freeze-thaw cycling conditions.....	171

Chernieva O., Morgenstern H., Raupach M.	Feasibility of using geopolymer solution in the conservation of architectural monuments.....	177
Човнюк Ю.В., Кравчук В.Т., Приймаченко О.В., Чередніченко П.П., Шудра Н.С.	Дослідження процесів масообміну, тепло- й масопереносу при інтенсивному зневодненні та твердінні капілярно-пористих тіл (на прикладі бетону для дорожнього покриття).....	185
Ярещенко Н.В.	Параметри моделі прогнозування розрахункових характеристик транспортного потоку на автомобільних дорогах.....	198
Ярещенко Н.В.	Оцінка параметрів моделі прогнозування розрахункових характеристик.....	205

Наукове видання

**Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві**

**Збірник наукових праць**

**Випуск 20**

Видається двічі на рік

Верстка С. В. Ротко

Матеріали друкуються в авторській редакції. За стилістику та орфографію статей відповідальність несуть автори

Підписано до друку 28 грудня 2023 р.

Формат 60 × 84 1/16. Папір офсетний

Умовн.друк.арк. 12,55. Обл. вид. арк. 12,25. Тираж 100 пр. Зам. №1

Відділ іміджу та промоції Луцького національного технічного  
університету, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

Друк – Вежа-Друк. Зам. №1

(м. Луцьк, вул. Шопена, 12, тел. (+380) 66 936 25 49.

Свідоцтво Держ. комітету телебачення та радіомовлення України

ДК № 4607 від 30.08.2013 р.