

06  
Л 54

ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



# МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

**Збірник наукових праць**

Дніпропетровського національного  
університету залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

**Випуск 13**

**2018**

20101

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

# **МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА**

**Збірник наукових праць  
Дніпропетровського національного університету  
залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**

За загальною редакцією проф. О. М. ПІШНЬКА

Засновано у 2011 році

**Випуск 13**



Дніпро  
2018



## ЗМІСТ

<b>А. В. ГАСЕНКО, І. А. ЮРКО, П. А. ЮРКО, Л. В. ГАСЕНКО</b> СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ РОЗРАХУНОК ПОЗАЦЕНТРОВО-СТИСНУТИХ СТЕРЖНІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД.....	4
<b>С. В. КЛЮЧНИК</b> ДО ПИТАННЯ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ СТАРИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ.....	12
<b>В. В. КОВАЛЕНКО, Ю. Л. ЗАЯЦЬ, С. В. КОВАЛЕНКО</b> КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	25
<b>КОВАЛЬ П. М., ГРИМАК О. Я., СТОЯНОВИЧ С. В.</b> ВРАХУВАННЯ ДІЇ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ РОЗРАХУНКУ БЕТОННИХ БАЛОК, АРМОВАНИХ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЮ АРМАТУРОЮ .....	37
<b>В. В. КУЛЯБКО</b> КАК «ВВЕСТИ В РЕЗОНАНС» ВСЕМИРНО ИЗВЕСТНЫЕ НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ ДНЕПРА ДЛЯ ПОДЪЕМА ИНЖЕНЕРНОГО ПРЕСТИЖА ГОРОДА .....	46
<b>Й. Й. ЛУЧКО</b> МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ГАЗОПРОВОДУ НА МІЦНІСТЬ, ВТОМНУ ТРИЩИНІСТІЙКІСТЬ.....	54
<b>І. В. МЯСНИКОВ, С. М. ГАПЄЄВ, М. О. ВИГОДІН, О. З. ПРОКУДІН</b> НОВІ ТИПИ МІЖРАМНОГО ОГОРОДЖЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ КРІПЛЕННЯ КАПІТАЛЬНИХ ВИРОБОК .....	67
<b>В. Д. ПЕТРЕНКО, О. Л. ТЮТЬКІН, О. Б. ХАВІН</b> ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ПЕРЕГІННИХ ТУНЕЛІВ, ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ В РІЗНИХ РІВНЯХ.....	75
<b>О. П. СЕВЕРИН, С. О. ЯКОВЛЄВ, О. І. ШАПТАЛА, І. Є. КРАМАР</b> УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОНТОННИХ СЕКЦІЙ НАПЛАВНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО МОСТУ (НЗМ-56) .....	91
<b>V. V. MAROCHKA, S. H. BOBOSHKO</b> DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF ARRANGING AREAS WITH TRANSITIONAL STIFFNESS INDEX ON APPROACHES TO RAILWAY BRIDGES.....	99

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.1/21.012.35:519.876.5[004.942]

А. В. ГАСЕНКО<sup>1\*</sup>, І. А. ЮРКО<sup>2</sup>, П. А. ЮРКО<sup>3</sup>, Л. В. ГАСЕНКО<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна, 36011, тел. +38 (050) 404 64 88, ел. пошта gasentk@gmail.com, ORCID 0000-0003-1045-8077

<sup>2</sup> Кафедра автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна, 36011, ORCID 0000-0003-3758-206X

<sup>3</sup> Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», вул. Преображенська, 5/2, м. Київ, Україна, 03037, ORCID 0000-0002-3485-435X

<sup>4</sup> Кафедра автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна, 36011, ORCID 0000-0002-1310-914X

### СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ РОЗРАХУНОК ПОЗАЦЕНТРОВО-СТИСНУТИХ СТЕРЖНІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

**Мета.** Виконати скінченно-елементний перевірочний розрахунок позацентрово-стиснутих стержнів залізобетонних конструкцій інженерних споруд. **Методика.** Чисельне моделювання напружено-деформованого стану конструкцій виконано в системі скінченно-елементного аналізу NASTRAN. Розрахунок виконано на основі деформаційної моделі та екстремального критерію міцності з використанням нелінійної діаграми бетону і дволінійної діаграми стану арматури. Як приклад, розраховано найбільш напружений елемент Г-подібної суцільної піврами двотаврового поперечного перерізу. **Результати.** Отримано графіки розподілу відносно головних осей деформацій і напружень на поверхні моделей, в арматурних стержнях та їх числові значення із вказуванням екстремумів. **Наукова новизна.** З'ясовано, що скінченно-елементне моделювання роботи конструкцій та їх елементів дає змогу врахувати особливості вичерпання їхньої несучої здатності та втрати місцевої чи загальної стійкості. Встановлено доцільність розбивання моделі будівельних конструкцій правильної геометричної форми на гексаедри із стороною, що складає 2-3 % від загальної висоти чи довжини досліджуваної моделі. **Практична значимість.** Розглянута чисельна модель залізобетонного елемента колони дозволяє проводити дослідження напружено-деформованого стану при різному відсотку армування та прикладання зосередженої сили. Моделювання напружено-деформованого стану стиснутого елемента дозволяє оптимізувати розміри зразків для проведення експериментальних випробувань, а також виділити місця на зразках, на які потрібно звернути особливу увагу під час проведення експерименту.

*Ключові слова:* залізобетонні конструкції; чисельне моделювання; метод скінченних елементів; напружено-деформований стан; позацентровий стиск

#### Вступ

Виявлення у конструкціях мостів і тунелів місць із найбільшими напруженнями в їх елементах завжди було актуальним питанням під час оптимізації розрахункових схем споруд, зміни умов їх роботи тощо [12, 13]. Для зменшення обсягів експериментальних досліджень можливе створення та дослідження моделей конструкцій шляхом комп'ютерного моделювання із використанням чисельних методів розрахунку [1].

Одними із основних будівельних матеріалів для спорудження мостів і тунелів є бетон та арматура. На протязі багатьох років сумісне

використання цих матеріалів дозволяло швидко та надійно споруджувати конструкції різного характеру й призначення [13]. На даному етапі розвитку теорії залізобетону його розглядають як нелінійно деформований матеріал [3]. Деформаційна модель розрахунку, заснована на повних діаграмах стану матеріалу, представлена в ДБН-В.2.6-98:2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції». Ця модель ускладнює розрахункові положення, а в деяких випадках вимагає проведення додаткових досліджень.

Розрахунок і конструювання стиснутих залізобетонних конструкцій на сьогодні розроблені

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

недостатньо, що сповільнює впровадження їх у практику будівництва [8, 11]. Проектування цих конструкцій ведеться в основному згідно з діючими ДБН-В.2.6-98:2009 та посібників до них. У деяких випадках виникає потреба для проведення ряду експериментальних досліджень направлених на отримання додаткових даних [10].

Одним з факторів, від яких залежить збільшення корисних навантажень на конструкції інженерних споруд, є несуча здатність колон, тому дослідження стиснутих залізобетонних елементів є актуальною задачею [2, 7].

### Мета

Виконати скінченно-елементний перевірочний розрахунок позакентровано-стиснутих стержнів залізобетонних конструкцій інженерних споруд.

### Методика

Для прикладу було розраховано Г-подібну суцільну півраму двотаврового поперечного перерізу по серії 1.800-2/74, випуск 3, яка застосовується при спорудженні збірних залізобетонних конструкцій [4]. Габаритні розміри таких Г-подібних піврам показано на рис. 1. Опорний, коньковий та карнизний вузли виконані прямокутного поперечного перерізу. Ухил ригельної частини піврами складає  $\frac{1}{4}$ . Опорний та коньковий вузли поперечної рами виконані шарнірними, а карнизний – жорстким. Залізобетонна піврама запроєктована з важкого бетону класу В30. В якості робочої арматури застосовується арматурна сталь класу А400С і А240С.

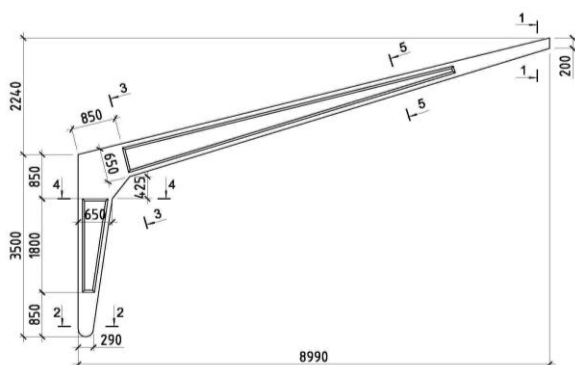


Рис. 1. Габаритні розміри та розрахункові перерізи Г-подібної піврами

Розрахунковий поперечний переріз елементів рами – симетричний двотавр з арматурою, що розташована у верхній і нижній полках (рис. 2). Висота перерізу ригеля і стійки змінюється прямолінійно від пришарнірних перерізів до конькового вузла. Для врахування зміни форми поперечного перерізу та армування, ригель піврами розбивається на сім розрахункових ділянок, а стійка – на п'ять. У межах кожної ділянки величина армування рами і всі геометричні характеристики поперечного перерізу, крім висоти, приймаються постійними. Кожна ділянка характеризується своєю крайньою координатою. Міцність перерізу перевіряється при кожній комбінації навантаження в наступних місцях рами (розрахункові перерізи показані на рис. 1):

- 1) біля шарнірів ригеля та стійки (перерізи 1-1 і 2-2);
- 2) в перерізах ригеля та стійки, що стиковані до місця перетину внутрішніх поверхонь ригеля і стійки з кутом карнизного вузла, зліва і справа від межі кожної ділянки на ригелі і стійці (перерізи 3-3 і 4-4);
- 3) в прольотному перерізі ригеля (переріз 5-5).

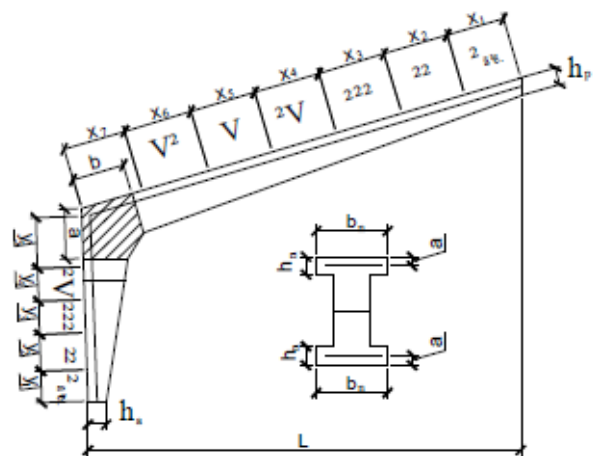


Рис. 2. До розрахунку піврами:

а) геометрична схема; б) поперечний переріз

Найбільш напруженим приймається переріз 4-4, що працює на позакентровий стиск. Розрахунок міцності у нормальному перерізі позакентровано-стиснутих залізобетонних стійок прямокутного перерізу піврам доцільно проводити на основі деформаційної моделі та екстремального критерію міцності з використанням нелінійної діаграми бетону і дволінійної діаграми стану

арматури [5]. Розподіл напружень у бетоні приймався за законом (згідно ДБН-В.2.6-98:2009):

$$\sigma_c = f_{cd} \sum_{n=1}^5 A_n \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^n, \quad (1)$$

де  $f_{cd}$  – розрахункове значення міцності бетону на стиск;  $A_n$  – коефіцієнти, котрі характеризують міцнісні властивості бетону;  $\varepsilon_{c1}$  – деформації, що відповідають межі міцності бетону при стиску.

При цьому в основу теоретичних досліджень покладено такі передумови:

- вважається, що бетон і поздовжня арматура працюють сумісно;
- не враховується гнучкість елементів (колон);
- при руйнуванні нормального перерізу в граничному стані нехтують роботою у розтягнутій зоні бетону;
- нейтральні лінії напружень і деформацій у нормальному перерізі співпадають;
- за розрахункову діаграму фізичного стану бетону при стиску приймається криволінійна діаграма з низхідною гілкою, для арматури при стиску (розтягу) – дволінійна діаграма Прандтля.

Прийняті передумови дають змогу значно спростити нелінійну деформаційну модель розрахунку. Запропонована методика розрахунку апробована авторами під час проведення експериментальних досліджень та комп'ютерного скінченно-елементного моделювання серії зразків [1].

Чисельне моделювання напружено-деформованого стану конструкцій виконано в системі NASTRAN. Ця програма скінченно-елементного аналізу визнана лідером у даному напрямку завдяки повному огляду явищ різної фізичної природи досліджуваних матеріалів [6, 9]. Використовувалася учбова демо-версія SDRС-FEMAP 8/1a S/N 000-00-00-DEMO-406F-00000000.

Геометричні моделі досліджуваних віртуальних зразків створювалися безпосередньо в підпрограмі Femap. Сталева та бетонні частини створювалися окремо. Габаритні розміри моделі складала 120×120×1000 мм. Для можливості прикладати зовнішнє навантаження із ексцент-

риситетом на кінцях моделі виконано збільшення перерізу. Схема моделі та ескіз прикладення навантаження показано на рис. 3.

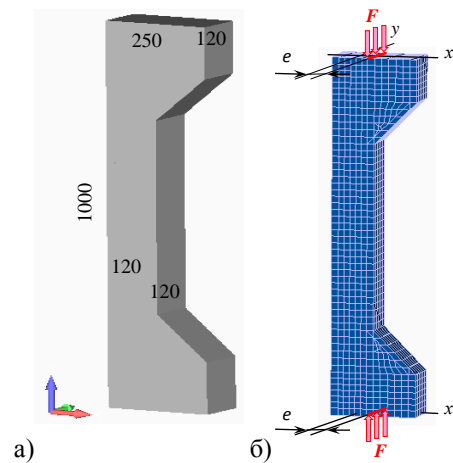


Рис. 3. Схема моделі (а) та ескіз прикладення навантаження на модель зразка (б)

Матеріали моделі – сталеві арматура і бетон – задавалися окремо, як ізотропні. Всі властивості матеріалів задавалися у вигляді скалярних величин. Значення фізико-механічних характеристик матеріалів (модуль пружності Юнга  $E$  і коефіцієнт поперечних деформацій  $\nu$ ) та закону деформування ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ), що показані на рис. 4, бралися згідно діючих норм. Приймалося, що розподіл напружень змінюється за законом (1).

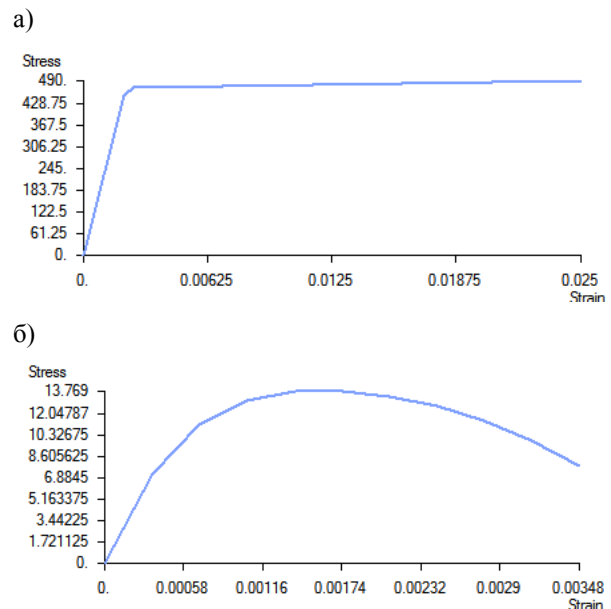


Рис. 4. Діаграми роботи сталі А400С (а) і бетону класу С20/25 (б)

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

## Результати

Проведення чисельних розрахунків методом скінченних елементів на електронно-обчислювальних машинах дозволило отримати графіки розподілу відносно головних осей деформацій і напружень на поверхні моделей, в арматурних стержнях та їх числові значення із вказуванням екстремумів. Виконано детальний аналіз місць концентрації напружень. Вигляд моделі ділянки колони із різним ексцентриситетом прикладання навантаження після деформування показано на рис. 5.

На рис. 6 та 7 показано розподіл напружень на поверхні та в арматурних стержнях модельованих елементів колон. На шкалі справа показані величина напружень на поверхні бетону та арматури згідно кольорового відтінку.

Значення міцності випробуваних зразків змінювалося залежно значення ексцентриситету прикладення навантаження. За граничне значення навантаження залізобетонного елемента прийнято таке, за якого в найбільш стиснутому чи в найбільш розтягнутому волокні перерізу елемента досягаються деформації, котрі відповідають межі текучості арматури або межі рівня деформацій  $\eta_u$  бетону.

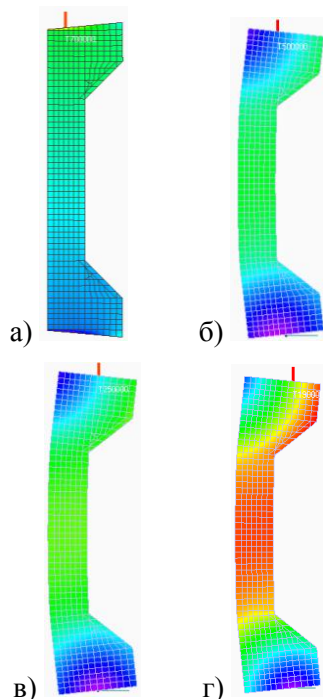


Рис. 5. Форма загальної втрати стійкості моделей при ексцентриситетах завантаження: 0 мм (а), 30 мм (б), 60 мм (в) і 90 мм (г)

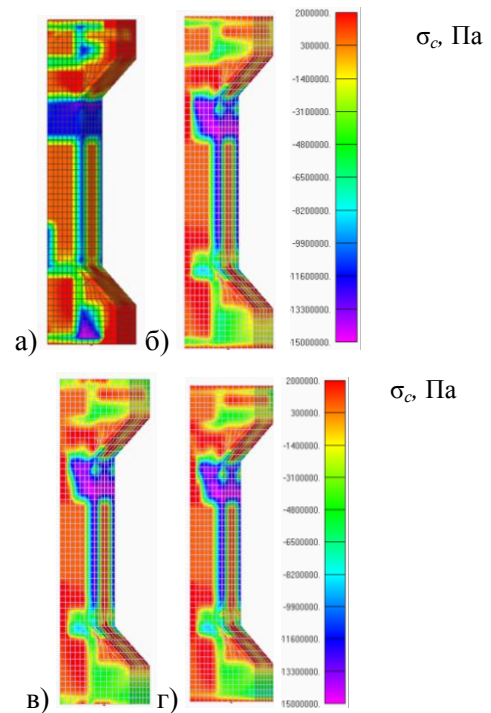


Рис. 6. Розподіл нормальних напружень на поверхні бетону моделей при ексцентриситетах навантаження: 0 мм (а); 30 мм (б); 60 мм (в); 90 мм (г)

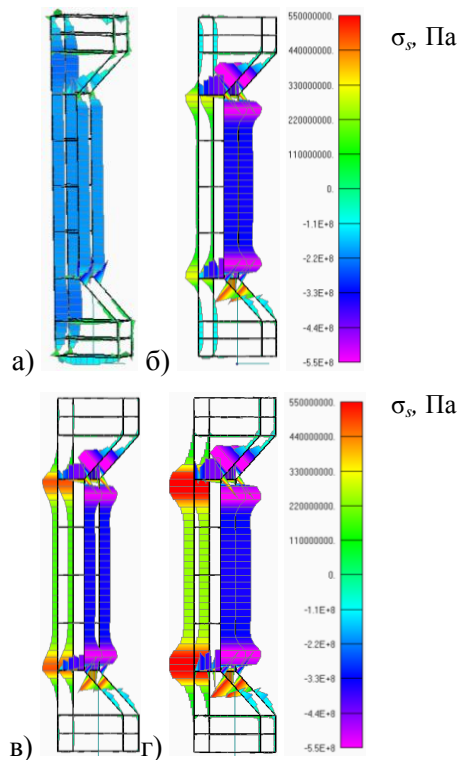


Рис. 7. Розподіл нормальних напружень в арматурі моделей при ексцентриситетах навантаження: 0 мм (а); 30 мм (б); 60 мм (в); 90 мм (г)

Найбільшу міцність зафіксовано у зразку, «випробуваному» на центральний стиск. Найменшу міцність мав зразок, «випробуваний» з ексцентриситетом прикладання навантаження  $e_0=90$  мм. Загалом при збільшенні ексцентриситету від 0 до 90 мм міцність зменшилася до 43 %. При дослідженні позацентрово стиснутих елементів особлива увага приділялась з'ясуванню положення нейтральної лінії у нормальному перерізі. Її положення у граничному стані дає можливість обчислювати значення рівнодійної напружень у бетоні стиснутої зони та встановлювати випадок розрахунку.

### Наукова новизна та практична значимість

У результаті проведення дослідження визначено, що скінченно-елементне моделювання роботи конструкцій та їх елементів на електронно-обчислювальній машині методом скінченних елементів дає змогу врахувати особливості вичерпання їхньої несучої здатності та втрати місцевої чи загальної стійкості. Авторами статті пропонується проводити розрахунок міцності у нормальному перерізі позацентрово-стиснутих залізобетонних елементів прямокутного перерізу на основі деформаційної моделі та екстремального критерію міцності з використанням нелінійної діаграми бетону і дволінійної діаграми стану арматури. Прийняті під час проведення скінченно-елементного моделювання розрахункові моделі будівельних конструкцій в програмному комплексі адекватні та відповідають реальним конструкціям.

Визначено доцільність розбивати моделі будівельних конструкцій правильної геометричної форми на гексаедри із стороною, що складає 2-3% від загальної висоти чи довжини досліджуваної моделі. При такій скінченно-елементній сітці значення нормальних напружень відрізнялися від середнього значення, порхованого по результатам всіх розрахунків, до 8,9%.

### Висновки

Розглядувана чисельна модель залізобетонного елемента колони є досить проста і дозволяє провести дослідження напружено-деформованого стану при різному відсотку армування та прикладення зосередженої сили. Використання комп'ютерної програми для мо-

делювання напружено-деформованого стану нормального перерізу стиснутого залізобетонного елемента колони дозволило виявити в конструкціях місця із найбільшими напруженнями. Моделювання напружено-деформованого стану стиснутого елемента дозволяє оптимізувати розміри зразків для проведення експериментальних випробувань, а також виділити місця на зразках, на які треба звернути особливу увагу під час проведення експерименту.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гасенко, А. В. Прогнозування напружено-деформованого стану стиснутих залізобетонних елементів шляхом комп'ютерного моделювання [Текст] / А. В. Гасенко, П. А. Юрко // Вісник СНАУ. Серія: Будівництво. – Суми, 2014. – Вип. 10 (18). – С. 85-90.
2. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. [Текст]. – Надано чинності 2007-01-01. – Київ : Мінбуд України, 2006. – 60 с.
3. Павликов, А. М. Решение задач прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов в нормальном сечении на основе нелинейной диаграммы состояния бетона [Текст] / А. М. Павликов, П. А. Юрко // Сборник научных трудов (отраслевое машиностроит., строит-во) / Полтав. нац. техн. ун-т им. Юрия Кондратюка. – Полтава : ПолтНТУ, 2011. – Вып. 1 (29). – С. 61-65.
4. Першаков, В. М. Каркасные здания из трёхшарнирных железобетонных рам : [монография] [Текст] / В. М. Першаков. – Киев : Книжное издательство НАУ, 2007. – 301 с.
5. Семко, О. В. Особливості моделювання напружено-деформованого стану легких сталевих тонкостінних конструкцій [Текст] / О. В. Семко, А. В. Гасенко, Д. М. Лазарев, Ю. О. Авраменко // Вісник ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 39. – С. 191-194.
6. Шимкович, Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows [Текст] / Д. Г. Шимкович. – Москва : ДМК, 2003. – 448 с.
7. Beicha, D. Effective transverse elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites [Text] / D. Beicha, T. Kanit, Y. Brunet, A. Imad, A. E. Moumen, Y. Khelifaoui // Mechanics of Materials. – 2016. – Vol. 102. – pp. 47-53. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.08.010.
8. Bishnu, P. A New method of applying long-term multiaxial stresses in concrete specimens

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- undergoing ASR, and their triaxial expansions [Text] / P. G. Bishnu, K. P. Daman // Materials and Structures. – 2016. – Vol. 49 (9). – pp. 3409-3508. – DOI : 10.1617/s11527-015-0734-z.
9. Hamid, H. Static and dynamic analysis of cracked concrete beams using experimental study and finite element analysis [Text] / H. Hamid, H. Mazaheri, H. Rahami, A. Kheyroddin // Periodica Polytechnica. Civil Engineering. – Budapest, 2017. – Vol. 62 (2). – pp. 337-345. – Access Mode : DOI : <https://doi.org/10.3311/PPci.11450>
  10. Hasenko, A.V. Causes of the eccentric compression reinforced concrete elements fixed joint stanchion and rafter gable frame of agricultural buildings [Text] / A. V. Hasenko, I. A. Yurko, O. G. Fenko, P. A. Yurko // The International Scientific Periodical Journal "Modern Technology and Innovative Technologies". – Germany : Karlsruhe, 2017. – Issue № 2, Vol. 2. – pp. 126-129. DOI : 10.21893/2567-5273.2017-02-02-033
  11. Hladka, K. I. Construction the bridge pier as parametric object using autodesk revit [Text] / K. I. Hladka, N. P. Bocharova // Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zalizničnogo transportu. – Dnipro, 2017. – Vol. 4 (70). – pp. 129-140. – Access Mode : DOI : [ps://doi.org/10.15802/stp2017/109648](https://doi.org/10.15802/stp2017/109648)
  12. Kluchnik, S. V. Stress-strain state of beam staged connection point of the railway bridge track-way [Text] / S. V. Kluchnik, K. I. Hladka, N. P. Bocharova // Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zalizničnogo transportu. – Dnipro, 2017. – Vol. 3 (69). – pp. 160-170. – Access Mode : DOI : <https://doi.org/10.15802/stp2017/104762>
  13. Marinichenko, O. H. Dynamic behavior of two-span continuous concrete bridges under moving of high-speed trains [Text] / O. H. Marinichenko // Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zalizničnogo transportu. – Dnipro, 2017. – Vol. 5 (71). – pp. 124-130. – Access Mode : DOI : <https://doi.org/10.15802/stp2017/115385>

A. В. ГАСЕНКО<sup>1\*</sup>, И. А. ЮРКО<sup>2</sup>, П. А. ЮРКО<sup>3</sup>, Л. В. ГАСЕНКО<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций и сопротивления материалов, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Первомайский проспект, 24, г. Полтава, Украина, 36011, тел. +38 (050) 404 64 88, эл. почта [gasentk@gmail.com](mailto:gasentk@gmail.com), ORCID 0000-0003-1045-8077

<sup>2</sup> Кафедра автомобильных дорог, геодезии, землеустройства и сельских зданий, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Первомайский проспект, 24, г. Полтава, Украина, 36011, ORCID 0000-0003-3758-206X

<sup>3</sup> Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», ул. Преображенская, 5/2, г. Киев, Украина, 03037, ORCID 0000-0002-3485-435X

<sup>4</sup> Кафедра автомобильных дорог, геодезии, землеустройства и сельских зданий, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Первомайский проспект, 24, г. Полтава, Украина, 36011, ORCID 0000-0002-1310-914X

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ РАСЧЕТ ВНЕЦЕНТРЕННО-СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Цель.** Выполнить конечно-элементный проверочный расчет внецентренно-сжатых стержней железобетонных конструкций инженерных сооружений. **Методика.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций выполнено в системе NASTRAN. Расчет выполнен на основе деформационной модели и экстремального критерия прочности с использованием нелинейной диаграммы бетона и двухлинейной диаграммы состояния арматуры. Для примера была рассчитана Г-образная сплошная полурама двутаврового сечения. **Результаты.** Получены графики распределения относительно главных осей деформаций и напряжений на поверхности моделей, в арматурных стержнях и их числовые значения с указанием экстремумов. **Научная новизна.** Выяснено, что конечно-элементное моделирование работы конструкций и их элементов позволяет учесть особенности исчерпания их несущей способности и потери местной или общей устойчивости. Установлена целесообразность разбивать модели строительных конструкций правильной геометрической формы на гексаэдр со стороны, составляющей 2-3 % от общей высоты или длины исследуемой модели. **Практическая значимость.** Рассмотренная численная модель железобетонного элемента колонны позволяет проводить исследования напряженно-деформированного состояния при различных процентах армирования и приложениях сосредоточенной силы. Моделирование напряженно-деформированного состояния сжатого элемента позволяет оптимизировать размеры образцов для проведе-

ния экспериментальных испытаний, а также выделить места на образцах, на которые нужно обратить особое внимание при проведении эксперимента.

*Ключевые слова:* железобетонные конструкции; численное моделирование; метод конечных элементов; напряженно-деформированное состояние; внецентренное сжатие

A. V. HASENKO<sup>1\*</sup>, I. A. YURKO<sup>2</sup>, P. A. YURKO<sup>3</sup>, L. V. HASENKO<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Department of reinforced concrete and stone construction and strength of materials, Poltava national technical Yuri Kondratyuk university, Pershotravneva avenue, 24, Poltava, Ukraine, 36011, tel. +38 (050) 404 64 88, e-mail gasentk@gmail.com, ORCID 0000-0003-1045-8077

<sup>2</sup> Department of highways, geodesy, land management and rural buildings, Poltava national technical Yuri Kondratyuk university, Pershotravneva avenue, 24, Poltava, Ukraine, 36011, ORCID 0000-0003-3758-206X

<sup>3</sup> State enterprise „State research institute of building constructions”, Preobrazhenska, 5/2, Kyiv, Ukraine, 03037, ORCID 0000-0002-3485-435X

<sup>4</sup> Department of highways, geodesy, land management and rural buildings, Poltava national technical Yuri Kondratyuk university, Pershotravneva avenue, 24, Poltava, Ukraine, 36011, ORCID 0000-0002-1310-914X

## FINITE ELEMENT CALCULATION OF ECCENTRICALLY COMPRESSED RODS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN ENGINEERING STRUCTURES DESIGN

**Purpose.** To perform a finite-element verification calculation of eccentrically-compressed rods of engineering structures' reinforced concrete structures. **Methodology.** Structures' stress-strain state numerical simulation in the NASTRAN system was performed. The calculation is based on the deformation model and the extreme strength criterion using a concrete nonlinear diagram and a reinforcement two-line state diagram. As an example, the most intense element L-shaped solid half-frame of the I-section was calculated. **Findings.** Graphs of the distribution relative to the principal axes of deformations and stresses on the surfaces of models, in reinforcing bars and their numerical values with extremum indications were obtained. **Originality.** It was found that the finite element simulation of the operation of structures and their elements allows taking into account the features of depletion of their bearing capacity and loss of local or general stability. The expediency of dividing the models of regular geometric shape building structures into a hexahedron with a side that is 2-3 % of the total height or length of the model under study was established. **Practical value.** The considered numerical model of the reinforced concrete column element allows to conduct studies of the stress-strain state at various percentages of reinforcement and applications of concentrated force. The compressed element stressed-deformed state simulation allows to optimize samples' dimensions for carrying out experimental tests, and to allocate places on the samples to pay special attention during the experiment.

*Keywords:* reinforced concrete structures; numerical modeling; finite element method; stress-strain state; eccentric compression

### REFERENCES

1. Hasenko A. V., Jurko P. A. Prohnozuvannya napruzhenno-deformovanoho stanu stysnutykh zalizobetonnykh elementiv shliakhom kompiuternoho modeliuvannya [Forecasting of strained-deformed state of compressed reinforced concrete elements by computer simulation]. Visnyk SNAU Publ., Seriya Budivnytstvo. Sumy, 2014, issue 10 (18), pp. 85-90.
2. DBN V.1.2-2:2006. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivnykh ob'ektiv. Navantazhennia i vplyvy. [System of reliability and safety of building objects. Load and impact]. Kyjiv, Minbud Ukrainy Publ., 2006. 60 p.
3. Pavlikov A. M., Jurko P. A. Reshenie zadach prochnosti vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh jelementov v normal'-nom sechenii na osnove nelinejnoj diagrammy sostojanija betona [Solving the problems of strength of eccentrically compressed reinforced concrete elements in the normal section on the basis of a nonlinear diagram of the state of concrete]. Sbornik nauchnyh trudov (otraslevoe mashinostrojtvo), Poltav. nac. tehn. un-t im. Jurija Kondratjuka. Poltava, PoltNTU Publ., 2011. issue 1 (29). pp. 61-65.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

4. Pershakov V. M. Karkasnye zdaniya iz trjohsharnirnyh zhelezobetonnyh ram, [monografija] [Frame buildings from three-hinged reinforced concrete frames: [monograph]. Kyjiv, Knizhnoe izdatel'stvo NAU Publ., 2007. – 301 p.
5. Semko O. V., Hasenko A. V., Lazariiev D. M., Avramenko Yu. O. Osoblyvosti modeliuvannia napruzhenodeformovanoho stanu lehkykh stalevykh tonkostinnykh konstruksii [Features of the simulated stress-strain state of light steel thin-walled structures]. *Visnyk DNUZT imeni akademika V. Lazariana*, Dnipropetrovsk, 2011. issue 39, pp. 191-194.
6. Shimkovich D. G. Raschet konstrukcij v MSC/NASTRAN for Windows [Calculation of structures in MSC/NASTRAN for Windows]. Moskow, DMK Publ., 2003. 448 p.
7. Beicha D., Kanit T., Brunet Y., Imad A., Moumen A. E., Khelfaoui Y. Effective transverse elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites. *Mechanics of Materials*, 2016, vol. 102, pp. 47-53. DOI 10.1016/j.mechmat.2016.08.010.
8. Bishnu P. A., Daman K. P. New method of applying long-term multiaxial stresses in concrete specimens undergoing ASR, and their triaxial expansions. *Materials and Structures*, 2016, vol. 49 (9), pp. 3409-3508. DOI 10.1617/s11527-015-0734-z.
9. Hamid H., Mazaheri H., Rahami H., Kheyroddin A. Static and dynamic analysis of cracked concrete beams using experimental study and finite element analysis. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*. Budapest, 2017, vol. 62 (2), pp. 337-345. Access Mode : DOI : <https://doi.org/10.3311/PPci.11450>
10. Hasenko A. V., Yurko I. A., Fenko O. G., Yurko P. A. Causes of the eccentric compression reinforced concrete elements fixed joint stanchion and rafter gable frame of agricultural buildings *The International Scientific Periodical Journal "Modern Technology and Innovative Technologies"*. Germany, Karlsruhe, 2017. issue № 2, vol. 2, pp. 126-129. DOI : 10.21893/2567-5273.2017-02-02-033
11. Hladka K. I., Bocharova N. P. Construction the bridge pier as parametric object using autodesk revit. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo univertsitetu zalizničnogo transportu*. Dnipro, 2017, vol. 4 (70), pp. 129-140. Access Mode : DOI : [ps:// doi.org/10.15802/stp2017/109648](https://doi.org/10.15802/stp2017/109648)
12. Kluchnik S. V., Hladka K. I., Bocharova N. P. Stress-strain state of beam staged connection point of the railway bridge track-way. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo univertsitetu zalizničnogo transportu*. Dnepr, 2017, vol. 3 (69), pp. 160-170. Access Mode DOI <https://doi.org/10.15802/stp2017/104762>
13. Marinichenko O. H. Dynamic behavior of two-span continuous concrete bridges under moving of high-speed trains. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo univertsitetu zalizničnogo transportu*. Dnipro, 2017, vol. 5 (71), pp. 124-130. Access Mode DOI <https://doi.org/10.15802/stp2017/115385>

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. І. Нетеса, д.т.н., доц. О. Л. Тютькін

Надійшла до редколегії 03.09.2018.

Прийнята до друку 22.10.2018.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.014.09:620.193

С. В. КЛЮЧНИК\*

\* Галузева науково-дослідна лабораторія штучних споруд, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 667 40 49, ел. пошта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

### ДО ПИТАННЯ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ СТАРИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ

**Мета.** Визначити вантажопідйомність реальної споруди в м. Жовті Води (ферми з нижнім поясом параболічної форми) з урахуванням часу експлуатації, особливості роботи прогонової будови і наявних дефектів, а також визначення можливості і умов пропуску по мосту сучасних поїзних навантажень і вирішення питань посилення, ремонту або заміни прогонових будов. **Методика.** Вантажопідйомність прогонових будов моста визначається методом класифікації відповідно до Галузевого стандарту України ДСТУ 32.6.03.111-2002 «Правила визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов залізничних мостів». **Результати.** На основі виконаних розрахунків отримані класи прогонової будови і класи сучасного і перспективного рухомого складу. Проведено аналіз використання прогонової будови яка відслужила вже понад 100 років під сучасне навантаження. **Наукова новизна.** Порівняно несучу здатність прогонових будов розрахованих по нормам 1886 р. з литого заліза з сучасними нормами. **Практична значимість.** На основі аналізу результатів проведених розрахунків встановлено запас міцності реального прогонової будови. Вказана можливість експлуатації прогонових будов моста в даний час під сучасні навантаження.

*Ключові слова:* вантажопідйомність; міцність; стійкість; витривалість; корозія; металеві мости

#### Вступ

На залізничних шляхах України експлуатуються мости різних типів, конструкцій та часу проектування, у тому числі мости, запроєктовані за старими нормами по навантаженню. Ці норми більш низькі в порівнянні з сучасними навантаженнями, а конструкції мостів мають суттєві дефекти, які впливають на вантажопідйомність споруд. Проблема використання старих мостів пов'язана з необхідністю перевірки їх вантажопідйомності з урахуванням наявних дефектів і забезпечення безпеки руху транспорту [2].

Зі збільшенням навантажень і швидкостей руху потягів існує необхідність приведення колії залізниці до такого стану, який не був би перешкодою для пропуску важких навантажень з великими швидкостями. Суттєвою перешкодою до цього є старі мости в разі їх слабкості або занадто знижених норм допустимих навантажень і надмірно жорстких умов обертання рухомого складу, що пред'являються до них. Мости є одним з найбільш дорогих елементів колії та вимагають колосальних витрат у разі необхідності збільшення їх вантажопідйомнос-

ті, що в сучасних умовах (ведення АТО та інші економічні труднощі) є непосильним. Очевидно, що за таких умов питання про заміну старих мостів може бути поставлене тільки у випадках їх повної непридатності та при абсолютній впевненості у своєчасності затрат. Пропускна здатність того чи іншого моста визначається напруженнями, які виникають в стержнях ферм під найбільш важкими рухомими складами, які обертаються на залізницях України і діючими технічними умовами. Наприклад, за технічними умовами на перерахунок старих мостів прийнятими в 1924 році найбільші напруження, з урахуванням динамічного впливу, не повинні перевершувати в мостах зі зварювального заліза, побудованих до 1883 г. –  $740 \text{ кг/см}^2$  [7]. Ця цифра була надзвичайно обережною і зменшеною. Вона навіть нижче тих напружень, які допускалися в мосту при його проектуванні, – факт небачений ніде в світі і мало виправданий. Напруження, яке можна з найменшою безпекою допустити в металі, легко визначити, звичайно, тільки при простому завантаженні. Міст в цілому являє складне поєднання стрижнів, а навантаження має ряд факторів, що посилюють його вплив на міст. Ці фактори не піддаються

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

більш-менш точному визначенню і враховуються емпіричними, частково заснованими на дослідних даних, коефіцієнтами. Питання встановлення допустимих напружень і його змін можна розглянути на досвіді США. Встановивши спочатку допустиме напруження для мостів зі зварювального заліза в  $1200 \text{ кг/см}^2$ , одночасно встановили над мостами ретельні спостереження. Спостереження показали, що ніяких шкідливих явищ в мостах не спостерігається, і напруження послідовно було підвищено з  $1200 \text{ кг/см}^2$  до  $1400 \text{ кг/см}^2$ , а в подальшому – до  $1560 \text{ кг/см}^2$ . Для аналогічних мостів допустиме напруження в Німеччині становило  $1400 \text{ кг/см}^2$  [7]. Отже, закордонна практика доводить, що при експлуатації старих існуючих мостів прийняття вдвічі меншого допустимого напруження не виправдано. Слід зазначити, що говорити про гіршу якість наших старих мостів, в порівнянні з закордонними, не доводиться. Конструкції і метал тих і інших майже не відрізняються один від одного. Крім того, значна кількість наших старих мостів часів початку ХХ століття взагалі проектувалося за кордоном і будувалося із закордонного металу. Умови ж експлуатації наших мостів безумовно відрізняються від закордонних меншими навантаженнями та швидкістю руху потягів. Звісно можна припустити дещо гірший стан їх утримання. Таким чином необхідно врахувати досвід Америки і Німеччини при визначенні вантажопідйомності старих мостів зі зварювального та литого заліза.

### Мета

Визначення вантажопідйомності реальної споруди моста біля м. Жовті Води (ферми з нижнім поясом параболічної форми) з урахуванням часу експлуатації, особливості роботи прогонової будови та наявних дефектів, а також визначення можливості та умов пропуску по мостах сучасних поїзних навантажень і вирішення питань підсилення, ремонту або заміни прогонових будов.

### Методика

Вантажопідйомність прогонових будов моста визначалася методом класифікації відповідно до Галузевого стандарту України ГСТУ 32.6.03.111-2002 «Правила визначення ванта-

жопідйомності металевих прогонових будов залізничних мостів» [2].

Визначенню вантажопідйомності прогонових будов передував детальний їх огляд з перевіркою геометричних розмірів елементів головних ферм, положення рейкової колії на прогонових будовах в плані та профілі.

Уточнювалися перерізи і прикріплення елементів головних ферм. Особлива увага зверталася на ослаблення перерізів елементів отворами під заклепки, корозією і т.ін.

При класифікації враховувалася якість заводського виготовлення і монтажу металоконструкцій, їх фізичний стан, наявність механічних пошкоджень, фізико-механічні властивості металу, з якого вони виготовлені.

Повний перерахунок методом класифікації був виконаний для всіх несучих елементів головних ферм моста.

Слід зазначити, що металеві прогонові будови моста були запроєктовані під розрахункове тимчасове навантаження прийняте згідно циркуляру Департаменту залізниці від 15 січня 1896 р. за № 753 із застосуванням методики, що базувалася на розрахунках по допустимим напруженням.

За наявності в елементах прогонових будов значної корозії, крім розрахункових перерізів, у яких діють найбільші зусилля, необхідно класифікувати також перерізи, які послаблені корозією.

Вплив корозії металу враховується введенням у розрахункові формули фактичних геометричних характеристик перерізів, які розглядаються, з урахуванням послаблення їх корозією.

У кожному такому перерізі повинні визначатися відповідні геометричні характеристики для частини перерізу, яка залишилася непошкодженою.

У розрахунках на витривалість елементів прогонових будов, які послаблені корозією, повинен враховуватися ефективний коефіцієнт концентрації напружень згідно з додатком І (розділ І.2) ГСТУ 32.6.03.111-2002 [2].

Наведений перерахунок вантажопідйомності металевих прогонових будов моста базується на розрахунках по граничних станах першої групи (на міцність, стійкість форми і витривалість, розрахунок гострих опорних вузлів). При цьому всі розрахунки елементів головних ферм виконуються на основне сполучення наванта-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

жень (власна вага і тимчасове вертикальне рухоме навантаження). Розрахунки на додаткове сполучення навантажень (власна вага і тимчасове вертикальне рухоме навантаження, гальмування, поперечний вітер) діючі норми дозволяють не проводити, оскільки довжина прогонних будов з наскрізними фермами на мосту менша 50 м.

Клас елементів визначався по формулі:

$$K = \frac{k}{k_{et}(1+\mu)}, \quad (1)$$

де  $k$  – допустиме тимчасове навантаження;  $k_{et}$  – еталонне навантаження (тимчасове вертикальне навантаження Н1 за схемою поїзда 1931 року);  $(1+\mu)$  – динамічний коефіцієнт того ж еталонного навантаження.

Для елементів головних ферм при розрахунках на основне сполучення навантажень тимчасове навантаження, що допускається, кН/м колії, визначалося по формулах:

– при розрахунку на міцність:

$$k_M = \frac{1}{\varepsilon_v n_v \Omega_v} (0,1mRG - \varepsilon_p p \Omega_p); \quad (2)$$

– на міцність верхніх поясів:

$$k_M = \frac{0,1mRF_{nm} - \varepsilon_p p \Omega_p}{\varepsilon_v (\gamma+1) n_v \Omega_v}; \quad (3)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт, який враховує вплив місцевого згину від мостового полотна та дії рухомого складу;

– при розрахунку на стійкість:

$$k_C = \frac{1}{\varepsilon_v n_v \Omega_v} (0,1m\varphi RG - \varepsilon_p p \Omega_p); \quad (4)$$

– при розрахунку на витривалість:

$$k_B = \frac{1}{\varepsilon_v \theta \Omega_v} (0,1m\gamma_w RG - \varepsilon_p p' \Omega_p). \quad (5)$$

У формулах (2) – (5) позначено:

$\varepsilon_v$  – частка вертикального навантаження рухомого складу, яка припадає на одну ферму;

$\varepsilon_p$  – частка постійного навантаження, яка припадає на одну ферму;

$n_v, n_w$  – коефіцієнт надійності до вертикального навантаження від рухомого складу і вітрового навантаження;

$\Omega_v, \Omega_p$  – площі ліній впливу нормальних зусиль в елементах наскрізних ферм, які відповідно завантажені тимчасовим вертикальним і постійним навантаженням, м;

$m$  – коефіцієнт умов роботи;

$R=185$  МПа – основний розрахунковий опір металу прогонової будови;

$G$  – розрахункова площа поперечного перерізу елемента, см<sup>2</sup>;

$p=51,1$  кН/м колії – величина розрахункового постійного навантаження у розрахунках на міцність і стійкість;

$\varphi$  – коефіцієнт поздовжнього згину, який визначається згідно з п. 4.3.9 і додатку Ж ГСТУ 32.6.03.111-2002 [2].

$\theta$  – коефіцієнт, який враховує зниження впливу рухомого навантаження у розрахунках на витривалість (див. п. 4.3.12 і додаток Б ГСТУ 32.6.03.111-2002) [2];

$\gamma_w$  – коефіцієнт зниження основного розрахункового опору у розрахунках на витривалість (п. 4.3.10 і додаток И ГСТУ 32.6.03.111-2002) [2];

$p'$  – сумарна інтенсивність нормативного постійного навантаження у розрахунку на витривалість, кН/м колії.

Враховуючи конструкцію ферми з полігональним нижнім поясом також необхідно виконувати розрахунок гострих опорних вузлів. До гострих опорних вузлів належать кінцеві вузли прогонових будов, що зазнають згину.

Клас гострого опорного вузла головної ферми прогонової будови (рис. 1) визначається:

– за нормальними напруженнями від згину в перерізах 1-1 (там, де розходяться пояси ферми), 2-2 (які віддалені від перерізу 1-1 на 0,4-0,5 м у бік найближчої опорної частини) та у місцях обриву горизонтальних листів;

– за дотичними напруженнями на опорі;

– за міцністю вертикальних пакетів біля нейтральної осі й за міцністю горизонтальних поясних заклепок.

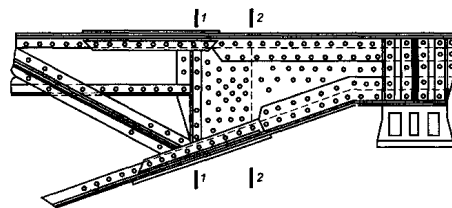


Рис.1. Схема гострого опорного вузла головної ферми

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Усі розрахункові перерізи приймаються вертикальними.

Допустиме тимчасове навантаження за нормальними напруженнями, кН/м колії, для гострого опорного вузла визначається розрахунками:

– на міцність:

$$k_M = \frac{1}{\varepsilon_v n_v} \left( \frac{0,002 m R_\chi W_0}{l a_0} - \varepsilon_p p \right); \quad (6)$$

– на витривалість:

$$k_B = \frac{1}{\varepsilon_v \theta} \left( \frac{0,002 m \gamma_w R_\chi W_0}{l a_0} - \varepsilon_p p' \right). \quad (7)$$

У формулах (6) і (7) прийнято:

$\chi=1,05$  – поправковий коефіцієнт згідно з п.4.3.8 ГСТУ 32.6.03.111-2002;  $W_0$  – розрахунковий момент опору поперечного перерізу пояса, який розглядається, см<sup>3</sup>;  $l$  – довжина розрахункового прогону, м;  $a_0$  – відстань від осі обпірання ферми до перерізу, який розглядається, м.

### Результати

Визначення вантажопідйомності прогонової будови з наскрізними фермами з нижнім поясом параболічної форми здійснене ГНДЛ штучних споруд ДНУЗТ в 2015 році.

Одноколіїний металевий міст через річку Жовту розташований на перегоні Жовті Води I – Жовті Води II Придніпровської залізниці. Отвір моста перекритий за схемою 44,66+11,5 м. Схему моста показано на рис. 2.

Прогони моста перекриті в прогоні 0-1 металевою прогоною будовою з наскрізними фермами з нижнім поясом параболічної форми та трикутною решіткою. Повна довжина ПБ 0-1 – 46,05 м, розрахункова довжина прогонової будови – 44,66 м.

В прогоні 1-2 встановлено балкову металеву прогонову будову з суцільною стінкою. Повна довжина ПБ 1-2 – 12,65 м, розрахунковий прогін – 11,50 м.

Їзда на мосту на обох прогонових будовах верхом по плитам БМП, що обперті безпосередньо на верхні пояси головних ферм та балок.

Розраховані прогонові будови по нормам 1886 та виготовлені в 1902 році з литого заліза. Проект моста затверджений Інженерною Радою, а тимчасове навантаження прийняте згідно циркуляру Департаменту залізниці від 15

січня 1896 р. за № 753. Залізничний міст через річку Жовту на переході Жовті Води – Жовта Ріка (стара назва) побудований в 1903 році під одну залізничну колію. Опори мосту були зведені з бутової гранітної кладки на цементному розчині і облицьовані повністю тесаним гранітом.

Міст експлуатується більше ста років і має фізичний знос та морально застарів через невідповідність розрахункових навантажень, прийнятих при проектуванні і наявністю дефектів прогонових будов, які впливають на вантажопідйомність і безпеку руху.

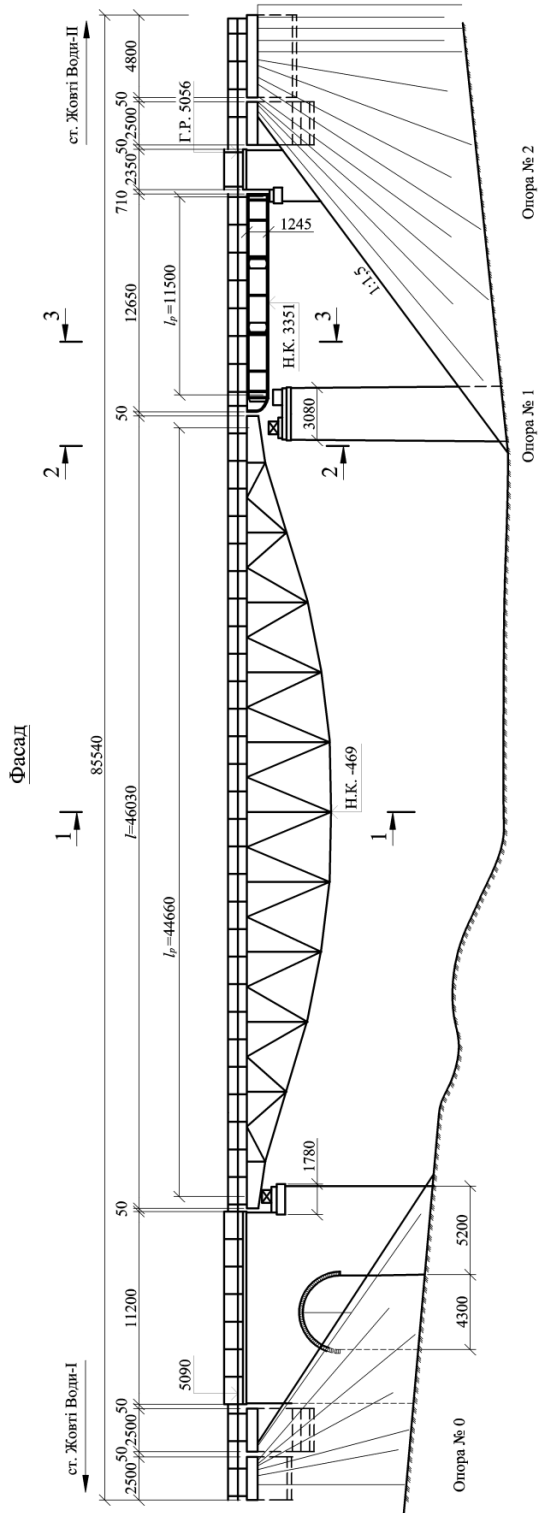
При обстеженні мосту виявлено, що елементи головних ферм металевих прогонових будов знаходяться в задовільному стані. Разом з цим, у вузлах ферм і в'язей між головними фермами є значні пошкодження металу корозією. На горизонтальних та вертикальних фасонках прикріплення до ферм поздовжніх та поперечних в'язей в нижній частині затримується волога. В нещільностях між фасонками і діагоналями в'язей та розкосів, а також нижніми горизонтальними листами нижнього поясу накопичуються продукти корозії металу, в результаті чого з'явилося розпучування на величину 3...6 мм і більше та деформація фасонки.

Особливо з виявлених дефектів металевої прогонової будови необхідно відзначити корозію основних несучих елементів (нижнього поясу).

Обчислення ординат ліній впливу зусиль в елементах головних ферм проводилося по методу кінцевих елементів за програмою «ЛІРА». При цьому ферми розраховувалися як стрижньові системи з шарнірним з'єднанням у вузлах. Лінії впливу нормальних зусиль в елементах ферм показані на рис. 3 і рис. 4. Результати розрахунків класифікації елементів головних ферм прогонової будови з параболічним нижнім поясом наведені у табл. 1.

За результатами виконаних розрахунків, мінімальний клас металевої прогонової будови з наскрізною фермою дорівнює 5,07 (за міцністю по прикріпленню), клас елементів при розрахунках на витривалість 4,44.

Для оцінки можливості пропускання по мостах рухомого складу залізниць (локомотиви, вагони, важкі транспортери та інші спеціальні навантаження), його класифікують за дією на мости. Класифікація рухомого складу полягає в тому, що його вплив на прогонові будови (еквівалентне навантаження) з урахуванням динамічного коефіцієнта виражається в одиницях еталонного навантаження ПІ.



Примітка.  
 Перерізи прогонових будов дивись на рис. 1.3

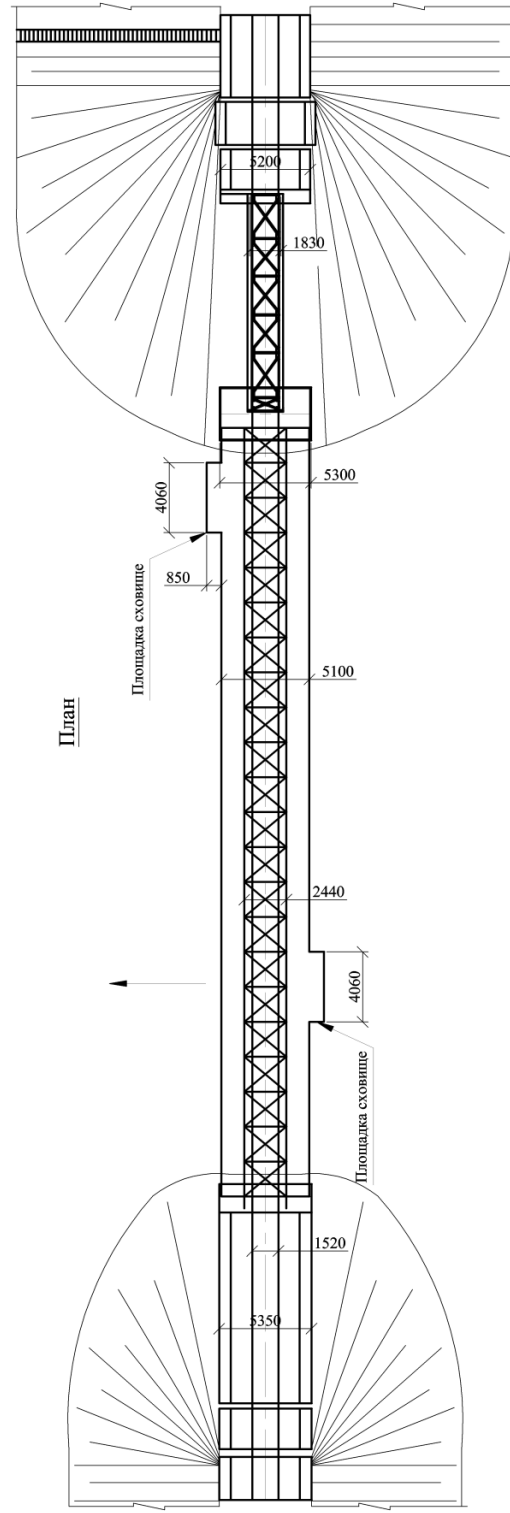


Рис. 2. Схема моста

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

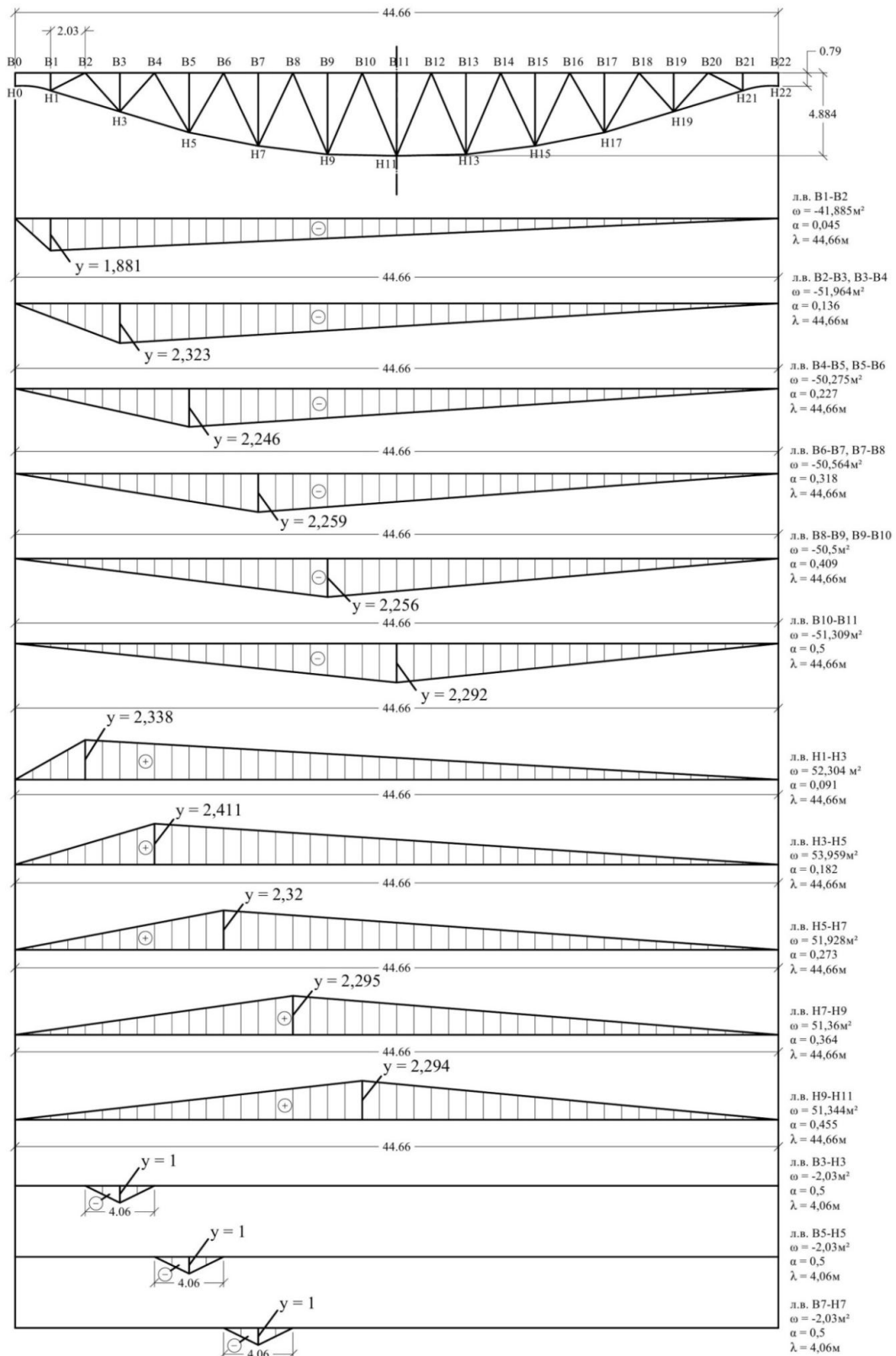


Рис. 3. Лінії впливу верхнього та нижнього поясів, а також стійок

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

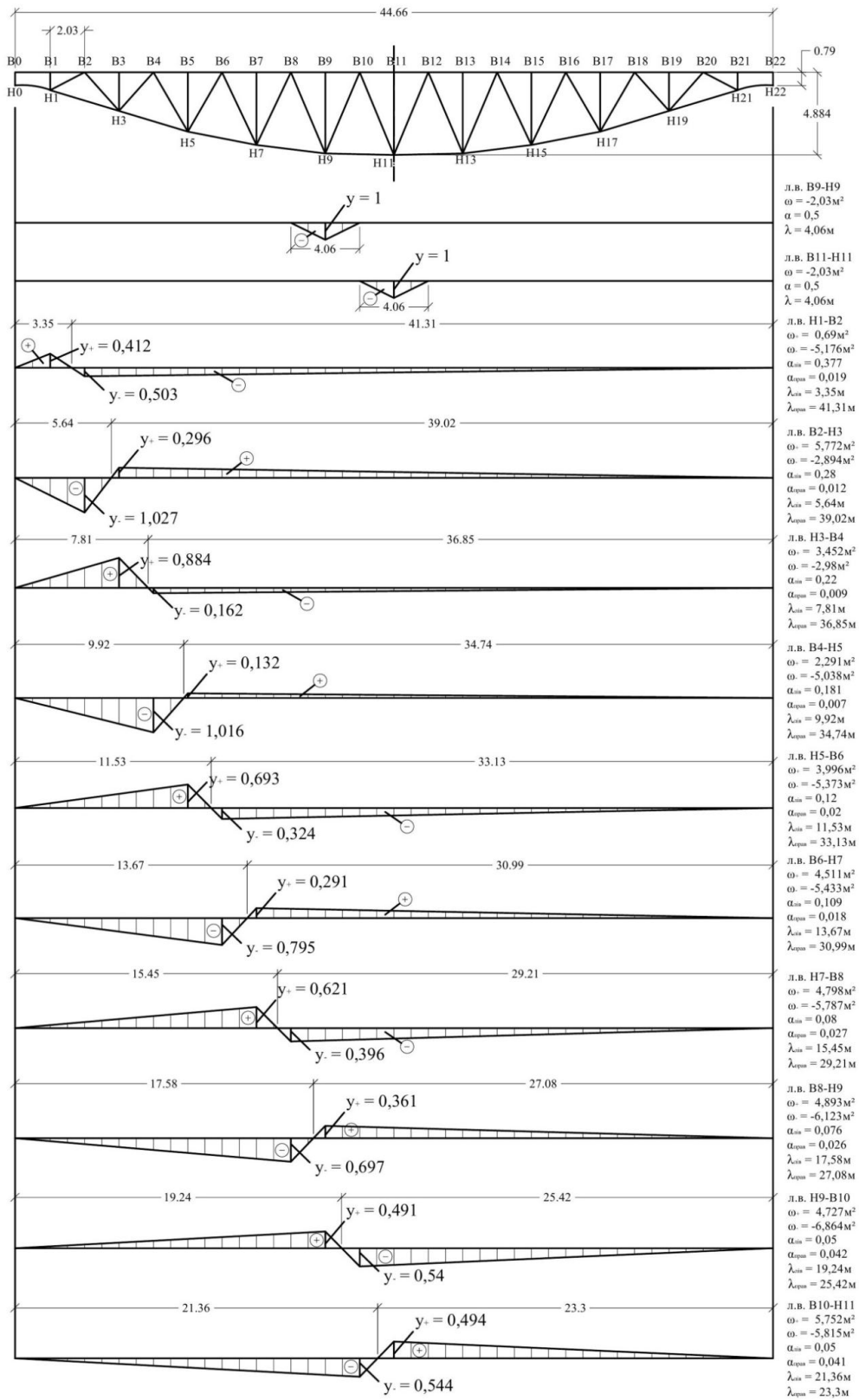


Рис. 4. Лінії впливу стійок та розкосів

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблиця 1

Зведена таблиця класів елементів головних ферм прогонової будови 0-1

Елемент	$\lambda$	$\alpha$	Класи елементів при розрахунках на				
			міцність		стійкість	$K_{\min}$ (по міцності чи стійкості)	витрива- лість $K_b$
			по пере- різу	по прикріп- ленню			
Гострий опорний вузол опори №0 Переріз 0-0	-	-	10,06	17,96	-	10,06	-
Гострий опорний вузол опори №0 Переріз 1-1	-	-	7,92	17,96	-	7,92	5,09
Гострий опорний вузол опори №0 Переріз 2-2	-	-	9,05	17,96	-	9,05	4,79
H1-H3	44,66	0,091	6,79	6,54	-	6,54	5,38
H3-H5	44,66	0,182	5,31	<b>5,07</b>	-	5,07	<b>4,44</b>
H5-H7 під B5-B6	44,66	0,273	6,17	5,9	-	5,9	5,0
H5-H7 під B6-B7	44,66	0,273	7,55	7,28	-	7,28	5,98
H7-H9	44,66	0,364	6,26	5,99	-	5,99	5,07
H9-H11 під B9-10	44,66	0,455	7,66	7,39	-	7,39	6,06
H9-H11 під B10-B11	44,66	0,455	6,27	5,99	-	5,99	5,07
B1-B2	44,66	0,045	7,59	7,39	8,11	7,39	-
B2-B3 B3-B4	44,66	0,136	6,05	5,87	6,48	5,87	-
B4-B5	44,66	0,227	6,27	6,09	6,71	6,09	-
B6-B7	44,66	0,318	6,74	6,55	7,18	6,55	-
H9-H11 під B10-B11	44,66	0,455	6,27	5,99	-	5,99	5,07
B1-B2	44,66	0,045	7,59	7,39	8,11	7,39	-
B2-B3 B3-B4	44,66	0,136	6,05	5,87	6,48	5,87	-
B4-B5	44,66	0,227	6,27	6,09	6,71	6,09	-
B6-B7	44,66	0,318	6,74	6,55	7,18	6,55	-
B8-B9	44,66	0,409	6,75	6,56	7,19	6,56	-
B10-B11	44,66	0,5	6,72	6,64	7,15	6,64	-
B3-H3	4,06	0,5	10,22	16,83	11,47	10,22	13,56
B5-H5	4,06	0,5	10,22	16,83	9,62	9,62	13,56
B7-H7	4,06	0,5	11,5	16,83	8,66	8,66	15,24
B9-H9	4,06	0,5	11,5	16,83	7,03	7,03	15,24
B11-H11	4,06	0,5	11,5	16,83	6,5	6,5	15,24
H1-B2	41,31	0,018	8,08	14,04	9,27	8,08	9,92
B2-H3	39,024	0,012	8,86	11,31	-	8,86	6,16
H3-B4	7,806	0,220	9,02	7,5	-	7,5	5,37
B4-H5	9,917	0,181	6,24	6,22	5,31	5,31	6,12
H5-B6	33,127	0,020	9,47	10,39	8,0	8,0	6,44
B6-H7	13,666	0,109	7,53	7,09	6,04	6,04	5,95
H7-B8	29,211	0,027	9,99	9,41	8,01	8,01	7,96
B8-H9	17,577	0,076	13,05	8,22	11,1	8,22	9,89
H9-B10	25,423	0,042	13,52	8,44	11,47	8,44	11,57
B10-H11	21,365	0,050	15,38	9,81	12,83	9,81	10,47

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

При цьому число одиниць еталонного навантаження  $K_0$  називають класом рухомого складу за дією на елементи моста і визначають за формулою

$$K_0 = \frac{k_0(1+\mu_0)}{k_{et}(1+\mu)}, \quad (9)$$

де  $k_0$  – еквівалентне навантаження для рухомого складу, який класифікується, кН/м колії;  $(1+\mu_0)$  – динамічний коефіцієнт рухомого складу, що класифікується;  $k_{et}$  – еквівалентне навантаження для поїзда Н1 за схемою Н1 1931 року, кН/м колії;  $(1+\mu)$  – динамічний коефіцієнт для еталонного навантаження.

При порівнянні класів елементів прогонових будов за міцністю та стійкістю з класами рухомого складу можливі такі випадки:

якщо  $K_0 \leq K$ , рух тимчасового навантаження можливий без обмеження швидкості (з установленою на дільниці швидкістю);

якщо  $K_0 > K$ , але  $\frac{K_0}{(1+\mu_0)} < K$ , то рух тимчасового навантаження можливий з обмеженням швидкості;

якщо  $K_0 > K$  і  $\frac{K_0}{(1+\mu_0)} > K$ , то рух відповідного навантаження по прогоновій будові неможливий навіть з обмеженням швидкості і необхідні підсилення або заміна прогонової будови.

У випадку недостатнього класу прогонової будови за витривалістю (при достатній величині класу за міцністю та стійкістю) швидкість руху поїздів не обмежується, але необхідно передбачити в плановому порядку підсилення відповідних елементів.

Обчислення еквівалентних навантажень від рухомого складу виконувалося при невідгудному розташуванні осей рухомого складу відносно вершин відповідних ліній впливу за формулами:

$$K_0 = \frac{2\sum P_i a_i}{\lambda^2} \text{ при } \alpha=0,0;$$

$$K_0 = \frac{4\sum P_i a_i}{\lambda^2} \text{ при } \alpha=0,5,$$

де  $P_i$  – навантаження від осі на рейки, кН;  $a_i$  – відстань від вантажу  $P_i$  до найближчого кінця лінії впливу з нульовою ординатою, м;  $\lambda$  – довжина лінії впливу, завантажена, м.

У відповідності з цими положеннями були класифіковані промислові тепловози, певні види і типи загальномережевих вантажних і спеціальних вагонів вантажного парку колії 1520 мм.

Технічні характеристики і схеми навантажень що обертаються по ділянці наведені в табл. 2, а еквівалентні навантаження і класи рухомого складу для прогонової будови  $l_p=44,66$  м наведені в табл. 3.

Таблиця 2

Схеми навантажень і характеристики рухомого складу

№ з/п	Тип рухомого складу	Маса, тс	Навантаження, кН/тс		Схема навантаження
			на вісь, кН (тс)	розподілене, кН/тс	
1	Промисловий тепловоз 2ТЭ116	276,0	$\frac{225,4}{23,0}$	$\frac{74,48}{7,6}$	
2	Промисловий тепловоз 2ТЭ10М	276,0	$\frac{225,4}{23,0}$	$\frac{79,67}{8,13}$	
3	4-осний суцільнометалевий піввагон із глухим кузовом, вантажопідйомністю 71,0 т, об'єм кузова 83,0 м³, моделі 12-1592, (ВАТ "Азов")	92,28	$\frac{223,6}{22,8}$	$\frac{64,3}{6,55}$	

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Закінчення таблиці 2

4	Вагон-хоппер дозатор г/п-71 тс, модель 25-4086	94,0	$\frac{230,3}{23,5}$	$\frac{76,89}{7,85}$	
5	Піввагон для сипучих металургійних матеріалів, г/п-100 тс, модель 22-4008	128,0	$\frac{313,6}{32,0}$	$\frac{111,80}{11,41}$	
6	Платформа ОАО ДВМ, г/п 100 тс, модель 23-4027	145,0	$\frac{355,25}{36,25}$	$\frac{102,08}{10,42}$	
7	4 <sup>х</sup> -осна цистерна для бензину и світлих нафтопродуктів, моделі 15-145, г/п-66,8 тс, об'єм котла 91,8 м <sup>3</sup>	94,0	$\frac{230,5}{23,5}$	$\frac{65,75}{6,7}$	

Таблиця 3

Еквівалентні навантаження і класи рухомого складу для прогонової будови  $l_p = 44,66$  м

№ з/п	Тип подвижного состава	Положення верхівки лінії впливу			
		$\alpha=0,0$		$\alpha=0,182$ (для НЗ-Н5)	
		Еквівалентна навантаження на 1 м моста, кН/м	Клас	Еквівалентна навантаження на 1 м моста, кН/м	Клас
1	Промисловий тепловоз 2ТЭ116	85,62	5,096	79,45	5,067
2	Промисловий тепловоз 2ТЭ10М	89,12	5,3	83,28	5,31
3	Чотирьохвісний суцільнометалевий піввагон із глухим кузовом, вантажопідйомністю 71,0 т, об'єм кузова 83,0 м <sup>3</sup> , моделі 12-1592, (ВАТ "Азов")	74,06	4,4	68,14	4,34
4	Вагон - хоппер дозатор г/п-71 тс, модель 25-4086	87,5	5,21	80,21	5,12
5	Піввагон для сипучих металургійних матеріалів, г/п-100 тс, модель 22-4008	124,8	7,43	115,48	7,34
6	Платформа ОАО ДВМ, г/п 100 тс, модель 23-4027	117,2	6,97	108,03	6,89
7	4 <sup>х</sup> -осна цистерна для бензину и світлих нафтопродуктів, моделі 15-145, г/п-66,8 тс, об'єм котла 91,8 м <sup>3</sup>	82,52	4,916	75,218	4,8

## Наукова новизна та практична значимість

Співставлення класу прогонової будови та класів рухомого складу показує, що вантажопідйомність моста через річку Жовту розташована

ного на перегоні Жовті Води I - Жовті Води II відповідно до Галузевого стандарту України ГСТУ 32.6.03.111-2002 не відповідає більшості сучасного навантаження. Вочевидь, необхідно підсилення слабких елементів.

Найменший клас прогонової будови при розрахунку на витривалість нижнього поясу НЗ-Н5 становить 4,44. Слід враховувати, що втома – це процес руйнування металів і сплавів без явних ознак пластичної деформації [5].

Наведений вид руйнування спостерігається при повторному та повторно-змінному навантаженнях, для яких характерна відсутність зміни форми та геометричних розмірів елементів, на підставі зростання тріщин втоми.

Руйнування при втомі являє собою найбільш небезпечний процес. Обумовлено це відсутністю явних ознак, які б дали змогу попередити про наближення руйнування, що у більшості випадків являється миттєвим процесом. Також корозія металу послаблює переріз елементів, і може приводити при виразковому її характері до концентрації напружень.

### Висновки

У випадку недостатнього класу прогонової будови за витривалістю (при достатній величині класу за міцністю та стійкістю) швидкість руху поїздів не обмежується, але необхідно передбачити в плановому порядку підсилення відповідних елементів [2], але вважати достатню величину класу за міцністю нижнього поясу (НЗ-Н5) теж не має підстави, бо вона становить 5,07, а клас рухомого складу від зчепів промислових тепловозів 2ТЭ116 – 5,067.

У наказі НКПС 1427 від 09.VII.1924 р. «Норми перерахунку старих залізних мостів» визначені норми допустимих напружень у елементах мостів допустиме напруження від сукупної дії вертикального навантаження і тиску вітру або від вертикального навантаження і зміни температури [7]. Ця величина для мостів з литого заліза, побудованих в період з 1898 р. по 1905 р., не повинно перевершувати  $14 \text{ кг/мм}^2$  (138 МПа), а тимчасовий опір розриву  $35 \dots 45 \text{ кг/мм}^2$ .

В теперішній час напруження в нижньому поясі (НЗ-Н5) з урахуванням послаблення перерізу корозією становить 134 МПа від зчепів промислових тепловозів 2ТЭ116 (зафіксованих на мосту), але це не найважче можливе навантаження. При цьому запас міцності ферми всього 2,9 %, тому потрібна термінова реконструкція моста по спеціальному проекту із підсиленням існуючих конструкцій.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – Надано чинності 2007-02-01. – Київ : Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
2. ДСТУ 32.6.03.111-2002. Правила визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов залізничних мостів [Текст]. – Надано чинності 2001-12-05. – Київ : Мін. транспорту України, 2003. – 382 с.
3. Інструкція по утриманню штучних споруд [Текст]. – Надано чинності 1999-04-27. / В. Ф. Сушков, Л. П. Ватуля, М. М. Літвінов і ін. – Київ : Мін. транспорту України, 1999. – 96 с.
4. Інструкція з визначення умов пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних залізничних мостах [Текст]. – Надано чинності 2002-06-10. Головне управління колійного господарства Укрзалізниці. – Київ : Мін. транспорту України, 2002. – 301 с.
5. Вакуленко, І. О. Втома металевих матеріалів в конструкціях рухомого складу [Текст] : навчаний посібник. / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Вид-во ДНУЗТ, 2011. – 154 с.
6. Страхова, Н. Є. Експлуатація і реконструкція мостів [Текст] / Н. Є. Страхова, В. О. Голубев, П. М. Ковальов и др. За ред. А. І. Лантух-Лященка. – Київ : 2000. – 384 с.
7. К вопросу об использовании старых мостов [Текст] // НКПС Мостовое бюро при ЦУЖЕЛЕ – Москва : Транспечать НКПС, 1930. – 204 с.
8. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи [Текст]. – Надано чинності 2009-11-11. – Київ : Мінрегіон-буд України, 2009. – 83 с.
9. Смирнов, А. Ф. Сопротивление материалов : учеб. для вузов [Текст] / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров, Н. И. Монахов Д.Ф. Парфенов и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1975. – 480 с.
10. Солдатов, К. І. Визначення класів залізничних залізобетонних прогонових будов мостів за величиною пружних прогинів. [Текст] / К. І. Солдатов, М. К. Журбенко, С. В. Ключник, В. А. Мірошник // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2012. – Вип. 3. – С 187-193.
11. Ovchinnikov, P. Sing of finite element modeling for determination of buckling possibility in lengthwise stiffeners of orthotropic plate for bridge spans under operational load [Текст] / P Ovchinnikov, S. Klyuchnik // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2012. – Вип. 5. – С 130-135.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

С. В. КЛЮЧНИК\*

\* Отраслевая научно-исследовательская лаборатория искусственных сооружений, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (050) 667 40 49, эл. почта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

## К ВОПРОСУ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ СТАРЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

**Цель.** Определить грузоподъемность реального сооружения у г. Желтые Воды (фермы с нижним поясом параболической формы) с учетом времени эксплуатации, особенности работы пролетного строения и имеющихся дефектов, а также определения возможности и условий пропуска по мостам современных поездных нагрузок и решения вопросов усиления, ремонта или замены пролетных строений. **Методика.** Грузоподъемность пролетных строений моста определяется методом классификации в соответствии с Отраслевым стандартом Украины ГСТУ 32.6.03.111-2002 «Правила определения грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов» **Результаты.** На основе выполненных расчётов получены классы пролётного строения и классы современного и перспективного подвижного состава. Проведен анализ использования пролётного строения со сроком службы более 100 лет под современную нагрузку. **Научная новизна.** Проведено сравнение несущей способности пролетных строений рассчитанных по нормам 1886 из литого железа с современными нормами. **Практическая значимость.** На основе анализа результатов проведенных расчётов установлено запас прочности реального пролётного строения. Указана возможность эксплуатации пролетных строений моста в настоящее время под современные нагрузки.

*Ключевые слова:* грузоподъемность; прочность; устойчивость; выносливость; коррозия; металлические мосты

S. KLUTCHNIK\*

\* Industrial research laboratory of artificial structures, Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 667 40 49, e-mail ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

## REGARDING THE ISSUE OF BEARING CAPACITY OF OLD BRIDGE SPANS

**Purpose.** To determine the bearing capacity of actual structure near town Zhouy Vody (Truss with parabolic lower belt) considering operation time, features of span work and existing flaws, also to determine the possibility and conditions of modern train loads passing over bridges and solutions of spans strengthening, repair or replacement problems. **Methodology.** Bearing capacity of bridge spans is being determined by classification method according to Industrial specification of Ukraine GSTU 32.6.03.111-2002 «Rules of determining of bearing capacity for steel bridge spans of railway bridges » **Findings.** Based on the performed calculations classes of the span and modern and perspective moving stock were determined. Analysis for operating the span with service time of more than 100 years with modern loads was conducted **Originality.** The comparison of bearing capacity of span made of cast iron designed according to 1886 specifications and modern specifications was conducted. **Practical value.** Based on calculations results analysis the margin of safety of actual bridge span was determined. The possibility of bridge span operation nowadays for modern loads was indicated.

*Keywords:* bearing capacity; strength; stability; durability; corrosion; steel bridge

## REFERENCES

1. *DBN V.2.3-14-2006. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektivannya* [State Standard V.2.3-14-2006. Transport constructions. Bridges and pipes. Design rule]. Kyjiv, Ministerstvo budivnytstva, arkhitektury i zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Publ., 2006. 359 p.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

2. DSTU 32.6.03.111-2002. *Pravyla vyznachennia vantazhopidomnosti metalevykh prohonovykh budov zaliznychnykh mostiv* [Rules for determining the carrying capacity of metal runways of railway bridges]. Kyjiv, Ministerstvo transportu Ukrainy Publ., 2003. 382 p.
3. Sushkov V. F., Vatulia L. P., Litvinov M. M. i in. *Instruktsiia po utrymanniu shtychnykh sporud* [Instruction on the maintenance of artificial structures]. Kyjiv, Transport Ukrainy Publ., 1999. 96 p.
4. *Instruktsiia z vyznachennia umov propusku rukhomoho skladu po metalevykh ta zalizobetonnykh zaliznychnykh mostakh* [Instruction on determining the conditions for passing the rolling stock on metal and reinforced concrete bridges]. *Holovne upravlinnia koliinoho hospodarstva Ukrzaliznytsi - The main department of the railways of Ukrzaliznytsia*. Kyjiv, Ministerstvo transportu Ukrainy Publ., 2002. 301 p.
5. Vakulenko I. O. *Vtoma metalevykh materialiv v kons-truktsiiah rukhomoho skladu, navchanyi posibnyk* [Fatigue of metal materials in rolling stock designs, tutorial]. Dnipropetrovsk, DNUZT Publ, 2011. 154 p.
6. Strakhova N. Ye., Holubiev V. O., Kovalov P. M. i in. *Ekspluatatsiia i rekonstruktsiia mostiv* [Exploitation and reconstruction of bridges]. *Za red. A. I. Lantukha-Liashchenka – Ed. A.I. Lantuch-Lyashenko*. Kyjiv, 2000. 384 p.
7. *K voprosu ob ispolzovanii starykh mostov* [On the use of old bridges]. Moscow, Transpechat Publ, 1930. 204 p.
8. *DBN V.1.2-15:2009. Mosty ta truby. Navantazhennja ta vplyvy* [Bridges and pipes. Loads and effects]. Kyjiv, Minregionbud Ukrainy Publ., 2009. 83 p
9. Smirnov A. F., Aleksandrov A. V., Monahov N. I., Parfenov D.F. i dr. *Soprotivlenie materialov, ucheb. dlja vuzov* [Resistance of materials: Textbook. for higher educational institutionst]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ, 1975. 480 p.
10. Soldatov K. I., Zhurbenko M. K., Klyuchnik S. V., Miroshnyk V. A. *Vyznachennia klasiv zaliznychnykh zalizobetonnykh prohonovykh budov mostiv za velychynoiu pruzhnykh prohyniv* [Determination of classes of railway concrete concrete runways of bridges by the size of elastic deflections]. *Mosty ta tuneli: teoriija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 3, pp. 187-193.
11. Ovchinnikov P., Klyuchnik S. *Using of finite element modeling for determination of buckling possibility in lengthwise stiffeners of orthotropic plate for bridge spans under operational load*. *Mosty ta tuneli: teoriija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2014, issue 5, pp. 130-135.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренко, д.т.н., проф. М. І. Нетеса*

Надійшла до редколегії 04.09.2018.

Прийнята до друку 22.10.2018.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.072.2/.7-027.45

В. В. КОВАЛЕНКО<sup>1\*</sup>, Ю. Л. ЗАЯЦЬ<sup>2</sup>, С. В. КОВАЛЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Кафедра «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, ел. пошта kovalenkovv@upr.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

<sup>2</sup>Кафедра «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 3731581, ел. пошта zyl41@ukr.net

<sup>3</sup>ПП «Логія», вул. Червона, 19-А, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 340 01 76, ел. пошта logiya2015@ukr.net

### КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

**Мета.** Попередження передчасного руйнування мостових конструкцій. **Методика.** В роботі застосовані макроструктурний, фрактографічний, аналітичний аналізи, методи фізико-механічних випробувань зразків бетону. **Результати.** В роботі предметом дослідження є не тільки структурний стан та властивості бетону мостових конструкцій, а й фізико-хімічні властивості сировинних матеріалів. Проведені дослідження передчасно зруйнованих балок мостових плитного типу показали: 1) невідповідність сировинних матеріалів: піску, щебеню та цементу вимогам стандартів; 2) наявність у хімічному складі води затворювання великої кількості карбонатних та гідрокарбонатних комплексів; 3) невідповідність вимогам сучасної технології методів та технічного регламенту виробництва в цеху мостових конструкцій заводу, що належить ПАТ «Укрзалізниця». Інноваційна технологія виробництва бетону мостових конструкцій дозволить попередити їх передчасне руйнування. **Наукова новизна.** В роботі застосовано комплексний аналітичний і технічний підхід до виявлення причин передчасного руйнування балок мостових плитного типу. Оцінено максимальну кількість факторів, які могли вплинути на їх передчасне руйнування. Показано, що сукупність факторів, які негативно вплинули на структурні характеристики бетону балок мостових плитного типу була значно поглиблена наявністю ефективних каталізаторів руйнівних процесів. Упровадження додаткових до українських стандартів вимог випробувань мікроструктурних характеристик щойно виготовленого бетону мостових конструкцій дозволить на ранніх стадіях виявити небезпечні фактори та спрогнозувати строк служби мостових конструкцій. **Практична значимість.** Дослідження фізико-механічних властивостей зразків бетону, виготовленого за новітніми технологіями підтвердили їх високу якість. Складність контролю хімічного складу сировинних матеріалів значно спрощується шляхом дослідження структурних параметрів цементного каменю готових виробів. Доведено необхідність впровадження інноваційної технології виробництва бетону та залізобетону мостових конструкцій.

*Ключові слова:* бетон; балки мостові плитного типу; сировинні матеріали; передчасне руйнування; технологія виробництва; механічні характеристики

#### Вступ

Попередження передчасних руйнувань залізобетонних мостових конструкцій є пріоритетним завданням для інженерного будівництва нашої країни [1-5, 23-26]. Однак це завдання не можна вирішити базуючись лише на декількох дуже обмежених критеріях. Так, наприклад, сучасні заповнювачі для бетону, особливо пісок, мають підвищену реакційну спроможність. Зміна сировинної бази у бік використання більш лужної сировини при виробництві цементу значно збільшує ризик виникнення корозії бетону. Понаднормова кількість пиловидних та глинистих часток в заповнювачах бетонної су-

міші також викликає передчасні руйнівні процеси в бетоні. Однак, що не найбільшою проблемою виробництва є відсутність контролю структурних параметрів цементного каменю щойно виготовленого бетону. Так, наприклад, формування у пересиченому вологою цементі крупних кристалів цементного каменю сприяє протягом одного-п'яти років експлуатації реструктуризації первинних цементних кристалів з кристалізацією структур вторинного еtringіту та таумаситу [27]. Ці структурні складові різняться у декілька разів за питомим об'ємом із первинними кристалами та сприяють деформу-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ванню мостових балок плитного типу, корозії бетону [27].

Пропоновані Дніпропетровським національним університетом експрес-методики випробувань лужності цементу, концентрацій оксидів основних елементів в цементі та цементному камені, виявлення його морфологічних та хімічних особливостей дозволить прогнозувати довговічність залізобетонних конструкцій на початковому етапі їх виготовлення [2, 5, 25]. Такі випробування ДНУЗТ пропонує проводити за лічені хвилини на відмінність від методик майже єдиної в Україні акредитованої лабораторії у м. Харків, яка вимагає на проведення випробувань хімічного складу цементу не менше тижня.

Попередні випробування сировинних матеріалів в рамках передбаченого стандартами вхідного контролю [6-11, 14, 21], в огляді на високі темпи виробництва, робити надзвичайно важко, а іноді неможливо у разі обмеженої кількості та віддаленості від виробництва відповідних акредитованих лабораторій. Однак, можлива та необхідна для вчасного надання рекомендацій постачальникам сировинних матеріалів, у разі використання неякісної сировини, організація контролю структури цементного каменю, що надасть необхідні відомості про реакційну спроможність складових бетону, а також прогноз довговічності конструкцій. Методика запатентована ДНУЗТ ще в 2009 році.

Спираючись на власних дослідженнях кислотності українських пісків [4, 25], можна зробити висновок, що у більшій їх частині вони мають кислотність понад 50 ммоль/л. Таким чином, для запобігання корозії цементного каменю необхідні інноваційні підходи до виробництва бетону та залізобетону мостових конструкцій. Такі підходи Університет пропонує ПАТ «Укрзалізниця». На ряду з контролем структурних параметрів цементного каменю Університет пропонує технологію виробництва бетону на базі застосування сучасної будівельної хімії українських виробників.

### Мета

Робота спрямована на виявлення причин передчасного руйнування балок мостових плитного типу та попередження передчасних руйнувань шляхом впровадження експрес методи-

ки аналізу структур цементного каменю в щойно виготовленому бетоні мостових конструкцій.

Об'єктом дослідження є бетон передчасно зруйнованих балок мостових плитного типу, технологія виготовлення бетону для мостових конструкцій, фізико-механічні властивості цього бетону.

### Методика

У роботі застосовано макроскопічні, фрактографічні методи дослідження структури зломів бетону, аналітичні дослідження технічної документації українських та європейських стандартів [6-22].

### Результати

Балки мостові плитного типу належать до найбільш навантаженої та вартісної частини конструкцій мостів.

У процесі роботи балки мостові плитного типу залізничних мостів навантажуються максимальними силами тиску вантажних локомотивів та навантажених вагонів, а також силами інерції поїздів, що рухаються. Ці сили викликають значні циклічні напруження вигину, внаслідок чого балки зазнають змінного навантаження, що може викликати мікро-розтріскування бетону, який не розрахований на напруження розтягу. Тому балки мостові плитного типу повинні мати високу міцність на стискання, жорсткість, зносостійкість поверхонь, і високі характеристики міцності на вигін. Необхідно відмітити, що максимальні навантаження на вигін (майже у 2 рази вищі ніж у звичайних бетонів) мають лише бетони з наноструктурованим цементним каменем.

Дослідження пошкоджених корозією балок мостових плитного типу проводили в Харківській області. Загальний вид пошкоджень наведено на рисунку 1. Як видно з рис. 1 (а, г, д), на поверхні бетону є сліди білої рідини – імовірно, так званого кальцієвого молочка. Всередині масиву бетону спостерігаються вологі грудки речовини жовтого кольору (рис. 1, б), з яких, у тому числі, інтенсивно вичавлюється на поверхню бетону балок мостових плитного типу гель жовтого кольору (рис. 1, е). На бетоні балок мостових плитного типу спостерігаються так звані «пухирці», при сколюванні поверхні яких

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

виявляються частки імовірно вапна, в діаметрі від 1 до 5 мм. Надалі припущення будуть експериментально перевірені.

а)



г)



б)



д)



в)



е)



Рис. 1. Загальний вигляд передчасно зруйнованих балок мостових плитного типу, що розташовані на ремонтно-виробничій базі виробничого підрозділу «Харківського будівельного поїзду» на ст. Нова Баварія регіональної філії «Південна залізниця»

Наявність вище згаданих дефектів, ілюстрованих на рис 1, викликало необхідність виявлення причин передчасного руйнування ненавантажених балок мостових плитного типу. Відбір зразків для мікроструктурного та хімічного аналізів було зроблено з представниками Південної залізниці, мостозагону, виробника та фахівців ДНУЗТ.

дбір зразків для мікроструктурного та хімічного аналізів було зроблено з представниками Південної залізниці, мостозагону, виробника та фахівців ДНУЗТ.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Результати досліджень показали, що при виробництві бетону використовувалися сировинні матеріали незадовільної якості. Крім того, технологія виробництва бетону з причини застарілості не змогла скасувати недоліки сировини та призвела до руйнування конструкцій протягом одного року зберігання на складі.

Випробування бетону у зрілому віці показали 60 МПа міцності на стискання.

Макроструктурний аналіз бетону балок мостових плитного типу показав, що бетонна суміш була неякісно укладена (рис.1, а, е) в результаті недостатньої її пластичності.

Утворення великих пор (рис.1, а, е) є наслідком перенасиченості бетонної суміші водою затворювання.

Наявність глибоких отворів в бетоні від щелебених часток вказує на погану адгезію щебеню до цементного каменя, що є наслідком підвищеної запиленості щебеню або наслідком проникнення продукту лужно-кремнієвокислої реакції до міжчасткових границь щебеню та кристалів цементного каменя (рис. 1, е).

Утворення імовірно «кальцієвого молочка» на поверхні бетонної конструкції вказує на підвищену пористість бетону, яка сприяє вимиванню з нього кальцієвих сполук (рис. 1, г). Подальші дослідження виявлять істинний хімічний склад білої рідини.

Виділення кремнієвого гелю з бетону (рис. 1, е) обумовлено, по-перше, його великою кількістю в структурі бетону, по-друге, утворенню сприятливих умов для його розрідження, тобто підвищення його текучості, по-третє, наявністю макро- та мікропористості в бетоні для виведення гелю з області високого тиску в середині бетонного масиву на його поверхню і четверте - регулярним продукуванням означеного гелю бетонним масивом.

Таким чином, усі представлені на рис. 1 дефекти є результатом недосконалості технологі-

чних прийомів виробництва балок мостових плитного типу.

Дослідження якості сировинних матеріалів для виробництва бетону балок мостових плитного типу проводили згідно чинного законодавства в сфері будівництва за ДСТУ [6-21].

Визначення фракційного складу, морфології та хімічного складу цементу, окремих піщаних часток, цементного каменя та продуктів лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні балок мостових плитного типу проводили з використанням методів електронної мікроскопії. Результати кількісного аналізу вмісту хімічних елементів, та особливо, співвідношень концентрацій хімічних елементів в структурних складових на плоских поверхнях речовин (наприклад кремнієвого гелю) та кристалах цементного каменя у високому вакуумі дозволяють виявляти кількість хімічних елементів з точністю до 0,01-0,01 відсотка мас, що є на рівні, або перевищує точність діючих стандартних методів аналізу. При цьому необхідно відмітити швидкість проведення вказаних випробувань, що дозволяє їх віднести до експрес методів визначення характеристик матеріалів.

Дослідження проводились на скануючому електронному мікроскопі з напругою, яка прискорює, у 10 кВ.

Послідовне сканування областей запресованого цементного порошку за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізатора, з загальною площиною області дослідження 4 мм<sup>2</sup>, дозволило отримати коректні дані про хімічний склад. Запресований зразок цементу виробництва ПрАТ «Волинь цемент» ПЦ І-500Н поміщали в камеру мікроскопу, відкачували атмосферу до отримання глибокого вакууму до 10<sup>5</sup> Па та проводили мікрорентгеноспектральний аналіз. Результати аналізу наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад цементу, площина сканування 4 мм<sup>2</sup>, % (мас.)

C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
3,87	38,7	0,28	0,35	2,24	7,47	2,64	0,00	1,01	40,74	2,73

Від відповідності характеристик цементу нормам стандарту ДСТУ Б. В 2.7-46:2010 [9] залежить структуроутворення цементного ка-

меня, фізико-механічні характеристики та довговічність залізобетонних виробів. При підвищеній лужності цементу (відносний коефіцієнт

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

лужності ( $\text{Na}_2\text{O}+0,658 \text{ K}_2\text{O}$ ) більшої за 0,6 % (мас.) [7]) в процесі гідратації та під час експлуатації залізобетонних підрейкових основ та інших інфраструктурних конструкцій та споруд відбувається реакція хімічної взаємодії луг цементу з кислими заповнювачами [7].

За державним стандартом [9] в портландцементі співвідношення за масою кальцій оксиду до силіцій діоксиду повинно становити не менше ніж 2,0, а масова частка оксиду магнію не повинна перевищувати 5 %, вміст сірки у перерахунку на  $\text{SO}_3$  не повинен перевищувати 3,5 %, але бути більше ніж 1 % (мас.), глини має бути не більше 1,2 % (мас.), вміст хлорид-іонів не повинен перевищувати 0,1 % (мас.). Трикальцієвий алюмінат у складі цементу не повинен перевищувати 8 % за масою.

Розрахунки вмісту нормованих елементів за концентрацією їх оксидів показали наступні результати. Вміст хлор-іонів не перевищує розмірів середньоквадратичної похибки експерименту та наближається до 0. Середнє співвідношення оксидів кальцію до оксидів кремнію ( $k=3,57$ ) гарантовано задовольняє вимогам діючого стандарту, теж можна сказати про вміст оксиду магнію (середн. конц.  $\text{MgO}$  дорівнює 0,58 % (мас.)). Розрахунок середніх значень приведенного коефіцієнту лужності цементу, концентрацій алюмінатних з'єднань у перерахунок на  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , концентрації сірки у перераху-

нок на  $\text{SO}_3$  показав, що вони не задовольняють вимогам діючого стандарту [9]. Так, наприклад, середнє значення концентрацій оксидів алюмінію та сірки складають 8,46 та 6,59 відсотків масових. Відповідно вміст оксиду сірки перевищує максимальний нормативний показник у 1,88 рази, оксиду алюмінію на 5,8 %.

Середній коефіцієнт приведенної лужності цементу становить 3,18 %, що у 5,3 рази перевищує нормативний показник, визначений ДСТУ [11].

Вміст оксидів сірки в цементних частках розмірами 25-48 мкм досягає від 36 до 41,34 % (мас.), що додатково сприяє сульфатній корозії бетону.

Вміст алюмінатної фази в частках цементу розміром близько 22 мкм досягає 10,43-33,07 % (мас.).

В достатньо великих цементних частках розміром близько 35 мкм підвищена концентрація атомів хлору – 0,13 % (мас.) може ініціювати та пришвидшувати лужно-кремнієвокислу реакцію та реструктуризацію в цементному камені зрілого віку.

В роботі досліджено сольовий склад води, що добувається з підземного верхнього водяного горизонту для виробничих процесів на Старокостянтинівському заводі ЗБШ. Результат випробувань наведено в табл. 2.

Таблиця 2

**Хімічний склад води затворювання для виробництва залізобетону на філії ПАТ Укрзалізниця «Старокостянтинівський завод ЗБШ»**

Показник	Норматив на питну воду, для орієнтування її якості	Результат досліджень
Загальний вміст солей, мг/л	1000	412
Жорсткість загальна, мекв/л	7	3,5
Амоній сольовий, мг/л	0,5	0,17
Залізо, мг/л	0,3	-
Хлориди, мг/л	350	15,9
Сульфати, мг/л	500	34,95
Фосфати, мг/л	3,5	3,86
pH	6-9	6,76
Нітрити, мг/л	1,0	-
Нітрати, мг/л	45,0	-
Фториди, мг/л	0,7-1,5	0,19
Гідрокарбонати, мг/л		390,4
Карбонати, мг/л		192

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

З табл. 2 видно, що основний склад сольової частини води складають гідрокарбонати та карбонати натрію та калію, що підтверджує показник рН. Вода є доволі м'яка, але велика концентрація лужних металів сприятиме ініціюванню та пришвидшенню лужнокремнієвокислої реакції в бетоні. До того ж іони карбонової кислоти та іони лужних металів легко проникають в будь які матеріали, у тому числі в цементний камінь, та при зміні температур в критичних областях (в області 0° С, та температур структурних перетворень) карбонат іони не встигають виходити з їх складу при охолодженні та викликають додаткові внутрішні напруження в цементних кристалах, які також можуть їх руйнувати.

Реакційну спроможність піску та щебеню досліджено за стандартними методиками у відповідність с ДСТУ Б В.2.7-75-98 [11], визначали хімічними методами за ГОСТ 8269.0-97.

Методи засновані на визначенні вмісту в щебенях і піску реакційноспроможного кремнезему, розчинного в 1М розчині гідроксиду натрію. Вміст розчинного в лугах кремнезему визначають ваговим або фотокolorиметричним методом.

Щебінь і пісок вважають не реакційноспроможними стосовно лугів і придатними до використання в якості заповнювача для бетонів, якщо вміст у них розчинного кремнезему не перевищує 50 ммоль/л.

Значення концентрації кремнію розчинного лугах наведені в табл. 3.

Таблиця 3

**Середній вміст розчинного кремнезему SiO<sub>2</sub> в заповнювачах бетону**

Найменування матеріалу	Пісок	Щебінь
Вміст розчинного кремнезему SiO <sub>2</sub> , ммоль/л	132,5	0,2

В табл. 4 наведено результати розсіву піску Горинь-Крупецького родовища ВКПП «Явір-Транс».

Модуль крупності піску складає 2,14, зерновий склад задовольняє вимогам ДСТУ [8].

Дослідження розмірів часток щебеню та наявності в них великих кристалів слюди, які знижують як міцності характеристики матеріалу (утворення великої доли щебеню ліщадної та голкоподібної форми), так і адгезивні властивості цементного розчину при формуванні бетонної суміші, проводилося за нормами ДСТУ [11]. За означеним стандартом мінімальний розмір часток фракції повинен складати від 90 до 100 %, 0,5(d+D) – від 30 до 80 %, максимальний розмір D – до 10 %, фракція розмірів 1,25 D не повинна перевищувати 0,5 %.

Результати розсіву щебеню фракції 5-25 ВП Самчинецького кар'єру Філії ЦУП ПАТ «Укрзалізниця» наведено в табл. 5.

Таблиця 4

**Результати розсіву піску Горинь-Крупецького родовища ВКПП «Явір-Транс»**

Залишки	Розмір сит, мм							Пройшло скрізь сито 0,16, в %
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
Часткові, г	0	220	1,10	8,30	231,00	475,00	9,10	9,60
Часткові, %	0	0	1,11	8,41	23,4	48,13	9,22	9,73
Повні, %	0	-	1,11	9,52	32,92	81,05	90,27	100

Таблиця 5

**Результати розсіву щебеню фракції 5-25 ВП Самчинецького кар'єру Філії ЦУП ПАТ «Укрзалізниця»**

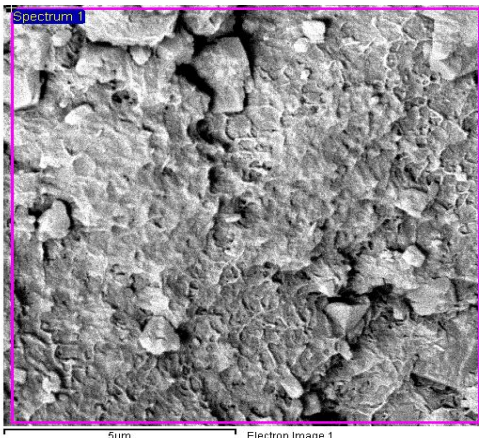
Залишки	Розмір сит, мм					Пройшло скрізь сито 0,16, в %
	25	20	10	5	0,16	
Часткові, г	-	2125	4350	275	13	-
Часткові, %	-	31,42	64,32	4,07	0,19	-
Повні, %	-	31,42	95,62	99,81	100	-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$d(5) = 99,81\%$ ;  $0,5(5+20) = 65,615\%$ ;  $D(20) = 31,42\%$ ;  $1,25 D = 0$

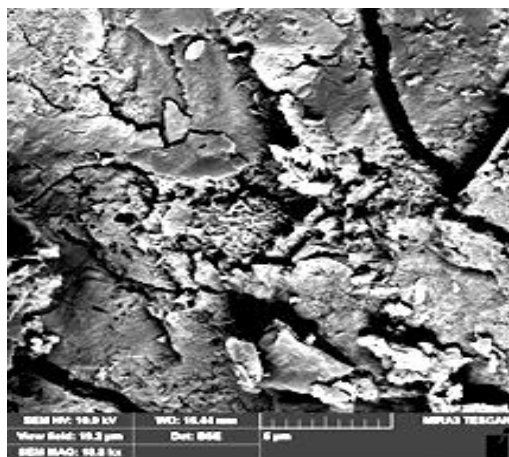
Виходячи з результатів розсіву щебінь Самчинецького кар'єру фракції 5-25 відповідає нормам ДСТУ [11], (см. табл. 5) Розмір кристалів слюди має до 30 мм в діаметрі.

Структура та хімічний склад цементного каменю на поверхні бетонного масиву мостових балок має подібний склад з таким у середині бетону (рис. 2, 3). В структурі присутні еtringітоподібні кристали, наявна значна пористість.



Spec trum	C	O	F	Na	Al	Si	Cl	K	Ca
1	23.65	40.41	0.28	0.11	0.28	1.45	0.38	0.26	33.17

Рис. 2. Мікроструктура та хімічний склад цементного каменю на поверхні бетону мостових балок плитного типу



Spec trum	C	O	F	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca
1	27.72	54.66	1.13	1.68	0.10	0.46	8.07	0.21	2.16	3.81

Рис.3. Мікроструктура цементного каменю в середині бетонного масиву мостових балок

Присутність активних елементів хлору, фтору в цементному камені та активних карбонатних сполук у воді дозволяє зробити висновок про високу активність реструктуризаційних процесів в бетоні, що досліджується. Також в структурі цементного каменю бетону присутні кристалічні новоутворення, схожі на еtringіт вторинний, що містить підвищену кількість каталізаторів реструктуризації. Інтенсивне його утворення відбувалося при температурі біля  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  та спричинило вигін балки мостової плитного типу із стрілою прогину до декількох сантиметрів з випуклою стороною спрямованою на світловий потік від сонця.

Макроструктурний аналіз руйнування залізобетонних шпал показав наявність наскрізних тріщин, які проходять по цементному каменю та по межах часток щебеню і піску з цементними кристалами.

На поверхні бетону мостових балок є виділення кальцієвого молочка, кремнієвого гелю.

Структура та хімічний склад середньої частини цементного каменю бетону шпал, де є мінімальний вплив оточуючого середовища показав як наявність крупних еtringітних кристалів, схильних до реструктуризації, так і присутність продуктів лужнокремнієвокислої реакції навколо аморфних або тих, що містять аморфний кремнезем, пісочних часток.

Резюмуючи результати досліджень можна стверджувати, що:

1. Приведений коефіцієнт лужності цементу перевищує нормативний показник  $0,6\%$  (мас.), визначений ДСТУ [7], в 5,3 рази та становить  $3,18\%$ . В максимальних за розмірами частках цементу близько  $67\text{ }\mu\text{m}$  коефіцієнт приведеної лужності збільшується до  $4,9\%$  (мас.), що у 8,17 раз перевищує максимальний показник за ДСТУ [7].

2. Вміст оксиду сірки в цементі складає  $6,59\%$  відсотків масових, що перевищує максимальний нормативний показник у 1,88 рази. Сірка входить у склад великих еtringітних кристалів, які на основі щільної матриці рівноважних цементних кристалів знижують структурну однорідність та сприяють утворенню додаткової мікропористості, яка полегшує всмоктування вологи бетоном з атмосферного повітря. Вміст оксидів сірки в цементних частках розмірами  $25\text{--}48\text{ }\mu\text{m}$  досягає від  $36$  до  $41,34\%$  (мас.), що

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

додатково сприяє сульфатній корозії бетону під час розчинення означених часток в процесі експлуатації бетонних виробів.

3. Вміст алюмінатної фази в цементі складає 8,46 % (мас.), але в частках цементу розміром близько 22 мкм досягає 10,43-33,07 % (мас.) Подібна концентрація алюмінатної фази в цементі сприяє разом з підвищеним вмістом оксидів сірки утворенню підвищеної пористості та структурним перетворенням в процесі експлуатації бетонних виробів.

4. Наявність хлору в окремих цементних частках сприяє пришвидшенню усіх реструктуризаційних процесів в цементному камені.

5. В сертифікаті якості даного цементу вказано єдиний з тих, що досліджено показник, а саме: вміст СЗА в клінкері. В сертифікаті цей показник не перевищує 8 відсотків.

6. Дослідження хімічного складу води затворювання для бетонної суміші для виробництва бетону балок мостових плитного типу показує, що основа сольового вмісту води складають карбонатні та гідрокарбонатні сполуки, які сприяють підвищенню активності реструктуризаційних процесів в цементному камені бетону.

7. Запиленість щебеню не забезпечує надійної його адгезії до цементного каменю.

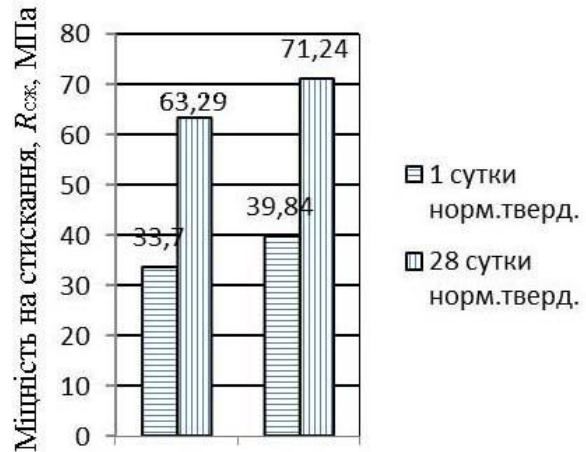
8. Жорсткість бетонної суміші не дозволяє ефективно проводити укладання форм для балок мостових плитного типу.

9. Термоволога обробка бетону прискорює та провокує реструктуризаційні процеси в бетоні балок.

Виходячи з встановлених причин руйнування автори розробили технологію виготовлення бетону із зниженою кількістю цементу (370 кг/м<sup>3</sup> бетону) на основі застосування вітчизняної добавки для бетонів ПЛКП виробництва ПП «Логія». Вплив означеної добавки у порівнянні із добавкою Sika viscocrete дозволив отримати підвищену міцність як на початковій стадії тужавіння так і на кінцевої (рис. 4).

Вітчизняна добавка дозволяє при температурі термовологої обробки 43 °С протягом 8 годин отримати відпускну міцність, яка на 18,2 % перевищує отриману з додаванням імпоротної добавки та кінцеву міцність, яка на 36 % перевищує нормативну.

Пропонована технологія дозволяє формувати сприятливу мікроструктуру цементного каменю близьку до наноструктурованої та отримувати підвищені характеристики міцності і завдяки зниженню кількості цементу – підвищену довговічність.



Sika Viscocrete ПЛКП 121  
ТВО 8 ч.=33,7 МПа ТВО 8 ч.=39,84 МПа

Рис. 4. Вплив хімічних добавок для бетону на жорстких сумішах на його ранню і кінцеву міцність

#### Наукова новизна та практична значимість

Науковою новизною даної роботи є застосування нової експрес-методики для виявлення небезпечних характеристик сировинних матеріалів та щойно виготовленого бетону.

Для попередження передчасних руйнувань пропонується застосування нової технології виготовлення бетону, яка економить ресурси та дозволяє отримувати більш якісний бетон.

#### Висновки

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Причиною передчасних руйнувань балок мостових плитного типу є невідповідна діючим стандартам якість сировинних матеріалів та застаріла технологія виготовлення.

2. В сучасних умовах українського виробництва мостових конструкцій та іншого залізобетону єдиним способом попередження передчасних руйнувань є застосування нової ресурсозаощадної технології з використанням хімічних добавок українських виробників, які

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

створюються спеціально для кожного окремого виробництва та враховують усі його особливості. Пропоновані добавки до бетонів не поступаються, а навіть перевищують властивості закордонних добавок для українських цементів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бутт, Ю. М. Химическая технология вяжущих материалов [Текст] / Ю. М. Бутт, М. М. Сычев, В. В. Тимашев. – Москва : Высшая школа. – 1980. – 237 с.
2. Деякі аспекти технологічних прийомів виробництва та контролю експлуатаційного ресурсу залізобетонних шпал в Україні та світі [Текст] / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, та інші. // *Залізничний транспорт України*, № 3/4. – Київ : – 2012. – С. 76-81.
3. Дослідження структури і властивостей мінеральних добавок для бетонів та будівельних розчинів [Текст] / В. Коваленко, С. Коваленко, А. Вовк, Ю. Заяць // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. – 2012. Вип. 1. – С. 28-32.
4. Дослідження фізико-хімічних властивостей дрібних заповнювачів для виробництва залізобетонних шпал [Текст] / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, та інші. // *Вісник ДНУЗТ*. – 2012. Вип. 40 – С. 140-145.
5. Дослідження експлуатаційної стійкості залізобетонних шпал та основні технологічні прийоми її покращення [Текст] / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, та інші. // *Будівництво України*. – 2011. Вип. 4. – С. 19-23.
6. ДСТУ Б.А 1.1-55-94. Природні піски для виробництва будівельних матеріалів. Терміни та визначення [Текст]. – Надано чинності 1995-01-01. – Київ : 1994. – 22 с.
7. ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 31384-2008, NEQ) [Текст]. Надано чинності 2011-11-12. – Київ : 2010. – 77 с.
8. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови [Текст]. – Надано чинності 1996-01-01. Київ : 1995. – 10 с.
9. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загально-будівельного призначення. Технічні умови [Текст]. Надано чинності 2011-09-01. – Київ, 2010. – 14 с.
10. ДСТУ Б В.2.7-71-98 (ГОСТ 8269.0-97). Будівельні матеріали. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань [Текст]. – Надано чинності 1999-01-01. – Київ, 1998. – 13 с.
11. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Будівельні матеріали. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови [Текст]. Надано чинності 1999-01-01. – Київ, 1998. – 14 с.
12. ДСТУ Б В.2.7-171:2008. Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови [Текст]. – Надано чинності 2010-01-04. – Київ, 2008. – 62 с.
13. ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови [Текст]. – Надано чинності 2010-01-04. – Київ, 2008. – 109 с.
14. ДСТУ Б В.2.7-210:2010. Будівельні матеріали. Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови [Текст]. – Надано чинності 2011-08-01. – Київ, 2010. – 20 с.
15. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками [Текст]. – Надано чинності 2010-09-01. – Київ, 2009. – 43 с.
16. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Бетони. Правила контролю міцності [Текст]. – Надано чинності 2010-09-01. – Київ, 2009. – 23 с.
17. ДСТУ Б В.2.7-273:2011. Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови (ГОСТ 23732-79, MOD) [Текст]. – Надано чинності 2012-01-12. Київ, 2011. – 4 с.
18. ДСТУ-Н Б А.1.1-83:2008. Система стандартизації та нормування у будівництві. Настава. Керівний документ В щодо визначення контролю виробництва на підприємстві в технічних умовах на будівельні вироби [Текст]. – Надано чинності 2009-01-01. – Київ, 2008. – 0 с.
19. ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008. Настава щодо застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах [Текст]. – Надано чинності 2010-04-01. – Київ, 2008. – 31 с.
20. ДСТУ ISO 3696:2003. Вода для застосування в лабораторіях. Вимоги та методи перевіряння; (ISO 3696:1987, IDT) [Текст]. – Надано чинності 2004-07-01. – Київ, 2003. – 8 с.
21. ДСТУ Б EN12620:2013. Заповнювачі для бетону (EN12620:2002+A1:2008, IDT) [Текст]. – Надано чинності 2014-10-01. – Київ, 2013. – 61 с.
22. EN 1504 Матеріали і системи для ремонту і захисту бетонних конструкцій [Текст]. Женева, 2009. – 105 с.
23. Кузнецова, Т. В. Алюминатные и сульфатные цементы [Текст] / Т. В. Кузнецова. – Москва : Стройиздат. – 1986. – 208 с.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

24. Полинг, Л. Химия [Текст] / Л. Полинг, П. Полинг; перевод М. В. Сахарова, ред. М. Л. Карапетьянц. – Москва. – 1978. – 354 с.
25. Проведення досліджень по встановленню причин руйнування залізобетонних шпал та розробка рекомендацій по підвищенню міцності бетону [Текст] : звіт (заключний) госпдоговір № ЦУПП-04/0035/10-53.2007.10.10 від 31.05.2010 // ДНУЗТ, Дніпро : 2010 - 190 с.
26. Хімічна та морфологічна оцінка якості цементу для виробництва залізобетонних шпал та хімічне дослідження води для бетонів і розчинів [Текст] / В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, П. А. Пшінько та інш. // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика – 2012. Вип. 2. – С. 13-18.
27. Штарк, И. Долговечность бетона [Текст] / И. Штарк, Б. Вихт. – Киев : Оранта. – 2004. – 295 с.

В. В. КОВАЛЕНКО<sup>1\*</sup>, Ю. Л. ЗАЯЦ<sup>2</sup>, С. В. КОВАЛЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Кафедра «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, эл. почта kovalenkovv@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

<sup>2</sup>Кафедра «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 3731581, эл. почта zyl41@ukr.net

<sup>3</sup>ЧП «Логия», ул. Красная, 19-А, Днепр, Украина, 49000, тел. +38 (050) 3400176, эл. почта logiya2015@ukr.net

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Цель.** Предупреждение преждевременного разрушения мостовых конструкций. **Методика.** Использованы: макроструктурный, фрактографический, аналитический анализы, методы физико-механических испытаний образцов бетона. **Результаты.** В этой работе предметом исследований являлось не только структурное состояние и свойства бетона мостовых конструкций, а и химические свойства сырьевых материалов. Произведенные исследования преждевременно разрушенных балок мостовых плитного типа показали: 1) несоответствие сырьевых материалов требованиям соответствующих стандартов; 2) наличие в химическом составе воды затворения большого количества карбонатных и гидрокарбонатных комплексов с натрием; 3) несоответствие требованиям современных технологий методов и технологического регламента производства бетона в условиях предприятия ПАО «Укрзалізниця». Инновационные технологии производства железобетона позволят предотвратить преждевременное разрушение мостовых конструкций. **Научная новизна.** В работе использован комплексный аналитический и технический подход к определению причин, которые могли повлиять на преждевременное разрушение балок мостовых плитного типа. Оценено максимальное количество факторов, которые могли негативно повлиять на их преждевременное разрушение. Показано, что совокупность факторов, которые негативно повлияли на структурные характеристики бетона балок мостовых плитного типа была значительно усугублена наличием эффективных катализаторов разрушительных процессов. Внедрение к требованиям современных Украинских стандартов испытаний структуры недавно изготовленных бетонов мостовых конструкций позволит на ранних стадиях выявлять опасные факторы и прогнозировать срок службы мостовых конструкций. Практическая значимость. Исследования физико-механических свойств образцов бетона, изготовленного по новой технологии, подтвердили их высокий уровень. Сложность контроля химического состава сырьевых материалов значительно упрощается путём исследования микроструктурных параметров цементного камня. Доказана необходимость внедрения инновационной технологии производства бетона и железобетона мостовых конструкций.

**Ключевые слова:** бетон; балки мостовые плитного типа; сырьевые материалы; преждевременное разрушение; технология производства; механические характеристики.

V. V. KOVALENKO<sup>1\*</sup>, Y. L. ZAYATS<sup>2</sup>, S. V. KOVALENKO<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Department «Life Safety» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 489 07 72, e-mail kovalenkovv@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

© В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, С. В. Коваленко, 2018

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

<sup>2</sup> Department «Life Safety» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 3731581, e-mail zyl41@ukr.net

<sup>3</sup> PE "Logiya", Chervona St., 19-A, Dnepr, Ukraine, 49000 tel. +38 (050) 3400176, e-mail logiya2015@ukr.net

## COMPREHENSIVE APPROACH TO SOLVING PROBLEMS OF DURABILITY OF FERRO-CONCRETE BRIDGE DESIGNS

**Purpose.** Prevention of premature failure of bridge structures. **Methodology.** Used: macrostructural, fractographic, analytical analyses, methods of physical and mechanical testing of concrete samples. **Findings.** In this work, the subject of research was not only the structural state and properties of concrete in bridge structures, but also the chemical properties of raw materials. Produced were the studies of prematurely destroyed slab-type bridge beams that showed: 1) inconsistency of raw materials with the requirements of the relevant standards; 2) the presence in the chemical composition of water of a large number of carbonate and hydrocarbonate complexes with sodium; 3) discrepancy with the requirements of modern technologies of methods and technological regulations of concrete production in conditions of the enterprise of PJSC "Ukrzaliznytsya". Innovative technologies for the production of reinforced concrete will prevent premature destruction of bridge structures. **Originality.** The work used a comprehensive analytical and technical approach to determining the causes that could affect the premature destruction of the bridge beams of plate type. The maximum number of factors that could adversely affect their premature failure was estimated. It is shown that the set of factors that adversely affected the structural characteristics of the concrete of the slab-type beams were significantly exacerbated by the presence of effective catalysts for destructive processes. The introduction to the requirements of modern Ukrainian standards of testing the structure of newly made concrete bridges will allow early detection of hazardous factors and predict the life of bridge structures. **Practical value.** Studies of the physical and mechanical properties of concrete samples manufactured using the new technology have confirmed their high level. The complexity of controlling the chemical composition of raw materials is greatly simplified by examining the microstructural parameters of the cement stone. The necessity of introduction of innovative technology of concrete and reinforced concrete production of bridge structures is proved.

**Keywords:** concrete; slab-type beams; raw materials; premature destruction; production technology; mechanical characteristics

### REFERENCES

1. Butt Yu. M., Sychev M. M., Timashev V. V. Himicheskaya tehnologiya vyzhushhih materialov [Chemical Technology of Binding Materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 237 p.
2. Rybkin V. V., Kovalenko V. V., Zayacz Yu. L. ta insh. Deyaki aspekty tehnologichnih prijomiv virobnyctva ta kontrolyu ekspluatacijnoho resursu zalizobetonnyh shpal v Ukrayini ta sviti [The aspects of technological acceptance by the viri-nity and the control of the use of the concrete sleepers in Ukraine in the world]. *Zaliz-nichnyj transport Ukrayiny*, no 3/4, Kyjiv, 2012, pp. 76-81.
3. Kovalenko V., Kovalenko S., Vovk A., Zayacz Yu. Doslidzhennya struktury i vlastyvostej mineralnyh dobavok dlya betoniv ta budivelnyh rozchyniv [Investigation of the structure and properties of mineral additives for concrete and building materials]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 1, pp. 28-32.
4. Rybkin V. V., Kovalenko V. V., Zayacz Yu. L., ta insh. Doslidzhennya fiziko-himichnih vlastyvostej dribnyh zapovnyuvachiv dlyavyrobnyctva zalizobetonnyh shpal [Investigation of physical and chemical properties of drill-type fillers for the production of iron-and-steel sleepers]. *Visnik DNUZT*, 2012, issue 40, pp. 140-145.
5. Rybkin V. V., Kovalenko V. V., Zayacz Yu. L. ta insh. Doslidzhennya ekspluatacijnoyi stijkosti zalizobetonnyh shpal ta osnovni tehnologichni pryjomi yih pok-rashhennia [Investigation of operational stability of iron-concrete sleepers and basic technological methods of its improvement.]. *Budivnyctvo Ukrayiny*, 2011, issue 4, pp.19-23.
6. DSTU B.A 1.1-55-94. *Pryrodni piski dlya vyrobnyctva budivelnyh materialiv. Terminy ta vyznachennya* [Natural sands for building materials production. Terms and definitions]. Kyjiv, 1994, 22 p.
7. DSTU B V.2.6-145:2010. *Konstrukciyi budynkiv i sporud. Zahyst betonnyh i zalizobetonnyh konstrukcij vid koroziyi. Zagalni tehnichni vymogy (GOST31384-2008, NEQ)* [Structures of buildings and structures. Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion. General technical requirements]. Kyjiv, 2010, 77 p.
8. DSTU B V.2.7-32-95. *Budivelni materialy. Pisok shhilnyj pryrodnyj dlya budivelnyh materialiv, vyrobiv, kon-*

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- strukcij i robit. Tehnichni umovy* [Building materials. Dense natural sand for building materials, products, structures and works. Specifications]. Kyjiv, 1995, 10 p.
9. *DSTU B V.2.7-46:2010. Budivelni materialy. Cementy zagalno-budivelnogo pryznachennya. Tehnichni umovy* [Building materials. Cements of general construction purpose. Specifications]. Kyjiv, 2010, 14 p.
  10. *DSTU B V.2.7-71 -98 (GOST 8269.0-97). Budivelni materialy. Shhebin i gravij iz shhilnyh girskyh porid i vidhodiv promyslovogo vyrobnyctva dlya budivelnyh robit. Metody fizyko-mehaničnyh vyprobuvan* [Building materials. Rubble and gravel from dense rocks and waste industrial production for construction work. Methods of physical and mechanical tests]. Kyjiv, 1998, 13 p.
  11. *DSTU B V.2.7-75-98. Budivelni materialy. Shhebin i gravij shhilni pryrodni dlya budivelnyh materialiv, vyrobiv, konstrukcij ta robit. Tehnichni umovy* [Building materials. Crushed and gravel dense natural for building materials, products, structures and works. Specifications]. Kyjiv, 1998, 14 p.
  12. *DSTU B V.2.7-171:2008. Budivelni materialy. Dobavky dlya betoniv i budivelnyh rozchyniv. Zagalni tehnicni umovy* [Building materials. Additives for concrete and mortars. General specifications]. Kyjiv, 2008, 62 p.
  13. *DSTU B V.2.7-176:2008. Sumishi betonni ta beton. Zagalni tehnicni umovy* [Concrete mixes and concrete. General specifications]. Kyjiv, 2008, 109 p.
  14. *DSTU B V.2.7-210:2010. Budivelni materialy. Pisok iz vidsiviv droblennya vyverzheny girskyh porid dlya budivelnyh robit. Tehnichni umovy* [Building materials. Sand from the dumping of crushing of eruptive rocks for construction work. Specifications]. Kyjiv, 2010, 20 p.
  15. *DSTU B V.2.7-214:2009. Betony. Metody vyznachennya micznosti za kontrolnymy` zrazkamy* [Concrete Methods of determining the strength of control samples]. Kyjiv, 2009, 43 p.
  16. *DSTU B V.2.7-224:2009. Betony. Pravyla kontrolyu micznosti* [Concrete Rules of strength control]. Kyjiv, 2009, 23 p.
  17. *DSTU B V.2.7-273:2011. Voda dlya betoniv i rozchyniv. Tehnichni umovy (GOST 23732-79, MOD)* [Water for Concrete and Solutions. Specifications]. Kyjiv, 2011, 4 p.
  18. *DSTU-N B A.1.1-83:2008. Systema standarty zacyi ta normuvannya u budivnyctvi. Nastanova. Kerivnyj dokument V shhodo vyznachennya kontrolyu vyrobnyctva na pidpryyemstvi v tehničnyh umovah na budivelni vyroby* [System of standardization and standardization in construction. Attitude. Guideline B on the definition of factory production control in the technical specifications for construction products]. Kyjiv, 2008, 10 p.
  19. *DSTU-N B V.2.7-175:2008. Nastanova shhodo zastosuvannya himičnyh dobavok u betonah i budivelnyh rozchynah* [Guidance on the application of chemical additives in concrete and mortar]. Kyjiv, 2008, 31 p.
  20. *DSTU ISO 3696:2003. Voda dlya zastosuvannya v laboratoriyah. Vymogy ta metody perevirannya; (ISO 3696:1987, IDT)* [Water for use in laboratories. Requirements and verification methods]. Kyjiv, 2003, 8 p.
  21. *DSTU B EN12620:2013. Zapovnyuvachi dlya betonu* [Fillers for concrete] (EN12620:2002+A1:2008, IDT). Kyjiv, 2013, 61 p.
  22. EN 1504 Materialy i systemy dlya remontu i zahystu betonnyh konstrukcij [Materials and systems for repair and protection of concrete structures]. Geneva, 2009, 105 p.
  23. Kuzneczova T. V. Aljuminatnye i sul'fatnye cementy [Aluminate and sulfate cements]. Moscow, Strojizdat Publ., 1986, 208 p.
  24. Polyng L., Poling P. Himiya [Chemistry]. Per. M. V. Saharova, red. M. L. Karapet'janc. Moscow, 1978, 354 p.
  25. Provedennya doslidzen po vstanovlennju pryčyn rujnuvannya zalizobetonnyh shpal ta rozrobka rekomendacij po pidvyshhennju micznosti betonu [Carrying out researches on the establishment of the prime of the destruction of reinforced sleepers and the development of recommendations for improving the strength of concrete]. Zvit NDR (zakluchnyj), gospdogovir N CzUPP-04/0035/10-53.2007.10.10 vid 31.05.2010 g. DNUZT, 2011, 190 p.
  26. Kovalenko V. V., Zayacz Yu. L., Pshinko P. A. ta insh. Himična ta morfologična ocinka yakosti cementu dlya vyrobnyctva zalizobetonnyh shpal ta himične doslidzhennja vody dlya betoniv i rozchyniv [Chemical and morphological evaluation of cement quality for the production of reinforced sleepers and chemical water analysis for concrete and mortar] *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 2, pp. 13-18.
  27. Shtark Y., Viht B. Dolgovečnost betona [The durability of concrete]. Kyjiv, Oranta Publ., 2004, 295 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. А. Плугін, д.т.н., проф. Й.Й. Лучко

Надійшла до редколегії 01.10.2018.

Прийнята до друку 22.10.2018.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.072.2/.7-033.37/.-036.5/.8

П. М. КОВАЛЬ<sup>1\*</sup>, О. Я. ГРИМАК<sup>2</sup>, С. В. СТОЯНОВИЧ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра архітектурних конструкцій, Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, вул. Вознесенський узвіз, 20, Київ, Україна, 04053, тел. +38 (044) 272 19 70, ел. пошта koval\_pm@meta.ua, ORCID 0000-0002-0040-5900

<sup>2</sup> Кафедра автомобільних доріг та мостів, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. + 38 (032) 258 21 11, ел. пошта grymak5oleg@gmail.com, ORCID 0000-0002-0515-1663

<sup>3</sup> Кафедра архітектурних конструкцій, Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, вул. Вознесенський узвіз, 20, Київ, Україна, 04053, тел. +38 (044) 272 19 70, ел. пошта serhiy\_st1985@meta.ua, ORCID 0000-0002-1363-7356

### ВРАХУВАННЯ ДІЇ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ РОЗРАХУНКУ БЕТОННИХ БАЛОК, АРМОВАНИХ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЮ АРМАТУРОЮ

**Мета.** Розробити пропозиції щодо врахування дії малоциклових навантажень при розрахунку бетонних балок, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою. **Методика.** Пропонується внести доповнення в розрахунки за другою групою граничних станів бетонних конструкцій, армованих базальтопластиковою арматурою, використавши результати експериментальних досліджень таких конструкцій. **Результати.** У формули для визначення прогинів і ширини розкриття тріщин введені коефіцієнти, визначені експериментально, які враховують дію циклічних навантажень різного рівня. Виконано порівняння експериментальних і теоретичних даних. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано врахування дії малоциклових навантажень при розрахунку бетонних конструкцій, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою. **Практична значимість.** Врахування дії малоциклових навантажень при розрахунку бетонних конструкцій, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою, забезпечить вищу надійність роботи таких конструкцій.

*Ключові слова:* малоциклові навантаження; бетонні балки; базальтопластикові арматури; прогини; ширина розкриття тріщин

#### Вступ

В сучасному будівництві широко використовується залізобетон, в ньому ефективно працюють бетон і сталеві арматури. Неметалева композитна арматура (НКА), яка не піддається корозії, має високу міцність на розтяг, діелектричні властивості, малу вагу, в останній час все частіше заміняє сталеву арматуру, особливо в будівлях та спорудах спеціального призначення. Її застосування для армування бетонних конструкцій стримується недостатнім дослідженням особливостей роботи таких елементів, обмеженим нормативним забезпеченням та малим досвідом експлуатації відповідних об'єктів.

Довговічність залізобетонних мостів, в залежності від конструкції, повинна складати 70-100 років згідно вимог норм. Але середній термін служби залізобетонних прогонових будов України не перевищує 47-50 років [1].

Перспективним напрямком у будівництві є використання неметалевої композитної арматури

у конструкціях транспортних споруд. В залізобетонних прогонових будовах мостів під час експлуатації відбувається карбонізація і хлоризація бетону, внаслідок чого сталеві арматури кородують, зменшується несна здатність і термін служби споруд. Використання неметалевої композитної арматури, яка не піддається корозії, дозволить суттєво знизити затрати на експлуатацію споруд та збільшити термін їх служби.

В Україні знаходяться значні поклади базальту, ряд заводів випускає високоякісну базальтопластикову арматуру. Виробництво такої арматури є менш шкідливим щодо впливу на навколишнє середовище у порівнянні із виробництвом сталевих арматур. Тому доцільно розробити науково-технічне і нормативне підґрунтя для використання в транспортному будівництві неметалевої композитної арматури, виготовленої із базальтових волокон.

Ґрунтовні дослідження механічних властивостей склопластикової та базальтопластикової арматури та її зчеплення з бетоном виконав

Солдатченко О. С. під керівництвом професора Клімова Ю. А. [2]. В цій роботі було також виконано експериментально-теоретичні дослідження напружено-деформованого стану згинаних бетонних елементів, армованих неметалевою арматурою; характер їх руйнування; їх міцність; жорсткість та тріщиностійкість. На основі цих досліджень розроблено методику розрахунку міцності, ширини розкриття нормальних тріщин і прогинів таких елементів, яка була використана у нормативному документі [3].

В роботі [4] описано експериментальні дослідження бетонних балок, армованих базальтопластиковою арматурою. Виконані дослідження показали, що несуча здатність балок із базальтопластиковою арматурою у 1,5 рази більша, ніж із сталевую. Зроблено висновок про ефективність використання базальтопластикової арматури в зв'язку з меншими затратами на виготовлення конструкцій та більшим терміном їх служби в агресивних середовищах у порівнянні із традиційною сталевую арматурою. Аналогічні результати отримані при дослідженні конструкцій із базальтопластиковою арматурою у роботах [5, 6, 7].

У США Міністерством транспорту у 1983 році була прийнята перша державна програма з дослідження і використання НКА «Застосування технології композитних матеріалів у проектуванні і будівництві мостів» [8]. Згідно цієї програми розроблено і реалізовано ряд проектів реконструкцій і будівництва мостів з НКА. В США і Канаді експлуатується біля 400 мостів, в яких використана НКА.

В Європі використання НКА у транспортному будівництві почалось у 1986 році в Німеччині, де був побудований автодорожній міст із застосуванням НКА. Арматура на основі скло-ролінгу була використана при будівництві дво-прольотного автодорожнього мосту та пішого-дного мосту у м. Дюсельдорфі [9].

У Канаді арматура з композитних матеріалів використовується для будівництва ряду автодорожніх мостів вже більше 20-ти років. У другій половині 90-х років тут були здані в експлуатацію 4 автодорожніх моста, при зведенні яких була використана композитна арматура (міст у м. Манітобі, та інші) [8]. На сьогоднішній день Канада займає лідируючі позиції в світі із застосування НКА при будівництві плит проїзної частини мостів. Відомо, що на конс-

трукції мостів діють постійні та тимчасові навантаження. Основними і найбільшими за вагою тимчасовими навантаженнями, на які розраховуються мости, є навантаження від транспортних засобів. В мостах є конструкції, які розраховуються на витривалість, тобто на багатоциклові навантаження  $2 \times 10^6$  і більше циклів.

Коваль П. М. і Полюга Р. І. встановили, що крім багатоциклових навантажень на конструкції мостів діють малоциклові навантаження високого рівня [10, 11], які суттєво впливають на прогонові будови. До таких навантажень відносяться пропуск по мостам великовагових навантажень, натурні випробування та інші випадки циклічних навантажень мостів до відповідного високого рівня.

Дослідження залізобетонних балкових конструкцій показують, що малоциклові навантаження впливають на механічні та деформативні параметри конструкцій, процеси, які проходять при дії таких навантажень зумовлені нелінійністю деформування, мікротріщиноутворенням накопиченням залишкових деформацій, розущільненням бетону [12].

Під керівництвом П. М. Ковалю науковці Р. І. Полюга, С. В. Стоянович, Я. І. Ковальчик виконали дослідження роботи залізобетонних згинаних балкових елементів, що згинаються, на малоциклові навантаження високого рівня.

Р. І. Полюга випробував п'ять серій балок розміром  $2100 \times 200 \times 100$  мм, армованих робочою арматурою  $\varnothing 12$  мм класу А-III із бетону різного складу та міцності [11]. На основі результатів виконаних досліджень запропоновано ширину розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах без попереднього напруження при дії малоциклових навантажень високого рівня визначати за формулою:

$$a_{cr} = \psi_{cyc} \frac{\sigma}{E} \psi \leq \Delta_{cr}, \quad (1)$$

де  $\psi_{cyc}$  – коефіцієнт, який враховує характер навантаження: при одноразовому навантаженні приймається  $\psi_{cyc}=1,00$ ; при повторних коротко-часних малоциклових навантаженнях, рівень яких становить 60 % від руйнівного,  $\psi_{cyc}=1,18$ ; якщо рівень становить 75 % від руйнівного, то  $\psi_{cyc}=1,4$ .

С. В. Стоянович досліджував натурні попередньо напруженні балки мостів довжиною 21 та 24 м [13]. Встановлено, що при дії малоцик-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

лових навантажень високого рівня фіброві деформації бетону балок збільшилися до 13,8 %, деформації канатної арматури – до 22,88 %, прогини – до 20,72 %. При натурних випробуваннях на повторні навантаження залізобетонних прогонових будов мостів зафіксовано збільшення прогинів балок на 3,38 %, деформацій бетону нижньої грані балок на 18,8 %. Дещо менший вплив малоциклових навантажень на прогини балок у складі прогонових будов у порівнянні з випробуваннями окремих балок пояснюється впливом просторової роботи та перерозподілом навантажень у прогоновій будові моста.

Я. І. Ковальчик дослідив попередньо напружені балки розміром 2100×210×100 мм, армовані канатами К-7, на дію малоциклових навантажень [14]. Запропоновано ширину розкриття нормальних тріщин в залізобетонних попередньо напружених елементах, що зазнають дії малоциклових навантажень, визначити за формулою:

$$a_{cr} = \psi_{cyc}^{crc} \frac{\sigma}{E} \Psi \leq \Delta_{cr}, \quad (2)$$

де  $\psi_{cyc}^{crc}$  – коефіцієнт, який враховує характер навантаження: при одноразовому навантаженні приймається  $\psi_{cyc}^{crc} = 1,00$ ; при повторних короткочасних малоциклових навантаженнях, рівень яких становить 60 % від руйнівного,  $\psi_{cyc}^{crc} = 1,41$ ; якщо рівень становить 75 % від руйнівного, то  $\psi_{cyc}^{crc} = 1,59$ .

На основі виконаних Я. І. Ковальчиком досліджень пропонується прогини  $f$  залізобетонних попередньо напружених елементів, які зазнають дії малоциклових навантажень, визначати за формулою:

$$f = \psi_{cyc}^f \sum \bar{M}(x) \frac{1}{\rho}(x) \Delta x, \quad (3)$$

де  $\psi_{cyc}^f$  – коефіцієнт, який враховує характер навантаження: при одноразовому навантаженні приймається  $\psi_{cyc}^f = 1,00$ ; при малоциклових навантаженнях, рівень яких становить 60 % від руйнівного,  $\psi_{cyc}^f = 1,12$ ; якщо рівень становить 75 % від руйнівного,  $\psi_{cyc}^f = 1,67$ .

Враховуючи, що малоциклові навантаження високого рівня суттєво впливають на деформативність та тріщиностійкість балкових залізобетонних елементів, що згинаються, доцільно дослідити на дію малоциклових навантажень і аналогічні бетонні елементи, армовані базальтопластиковою арматурою.

**Мета**

Розробити пропозиції щодо врахування дії малоциклових навантажень при розрахунку бетонних балок, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою.

**Методика**

При розробці методики розрахунку балкових базальтобетонних конструкцій мостів, що згинаються, за основу взято досвід розробки аналогічних нормативних документів для конструкцій з НКА за кордоном. Як свідчить огляд таких норм, вони базуються на підходах до розрахунку залізобетонних конструкцій із врахуванням особливостей матеріалів (НКА) та визначених експериментально особливостей роботи бетонних конструкцій, армованих НКА.

Вимоги до розрахунку залізобетонних конструкцій мостів викладені у ДБН В.2.3-14:2006 [15]. Механічні характеристики міцності базальтопластикової арматури приведені в ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012 [3]. В настанові є також принципи розрахунку, правила конструювання і виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою.

Для забезпечення вимог безпеки базальтобетонні конструкції повинні мати такі початкові властивості, які з необхідним ступенем надійності для різних розрахункових ситуацій у процесі будівництва і експлуатації виключають можливість руйнування будь-якого характеру або порушення експлуатаційної придатності, пов'язаного із спричиненням шкоди для життя або здоров'я людини, майна або навколишнього середовища протягом всього проектного строку служби експлуатації відповідно до п. 4.2.1 ДБН В.2.3-22 [16].

Щоб забезпечити вимоги експлуатаційної придатності базальтобетонна конструкція повинна мати такі початкові властивості, які з належним ступенем надійності для різних розра-

хункових впливів запобігають утворенню або надмірному розкриттю тріщин, виникненню надмірних переміщень, коливань та пошкоджень, які ускладнюють нормальну експлуатацію.

Для забезпечення вимог довговічності базальтобетонна конструкція повинна мати такі початкові властивості, які б у встановлений термін експлуатації задовільняли вимоги з безпеки та експлуатаційної придатності з урахуванням впливу на геометричні характеристики конструкцій та механічні властивості матеріалів різних розрахункових впливів (тривала дія навантаження, багаторазово повторні навантаження, несприятливі кліматичні, технологічні впливи, зміни температури та вологості, зміни заморожування та відтавання, агресивні впливи тощо) відповідно до ДБН В.1.2-15 [17].

Для отримання експериментальних даних про напружено-деформований стан бетонних балок, армованих базальтопластиковою арматурою, авторами було досліджено 48 зразків балок на дію одноразових і малоциклових навантажень і виконано порівняльний аналіз отриманих результатів [18].

### Результати

Експериментальними дослідженнями було встановлено, що малоциклові навантаження високого рівня не вплинули на несну здатність за згинальним моментом базальтобетонних і базальтофібробетонних балок. Тому в розрахунки за першою групою граничних станів таких конструкцій при дії на них малоциклових навантажень не потрібно вносити ніяких доповнень.

Як показали експериментальні дослідження, при дії малоциклових навантажень високого рівня в балкових базальтобетонних конструкціях, що згинаються, збільшується ширина розкриття тріщин і ростуть прогини. Тому доцільно внести доповнення в розрахунки таких конструкцій за другою групою граничних станів при дії малоциклових навантажень.

Ширину розкриття нормальних до поздовжньої осі тріщин  $a_{cr}$  у балкових базальтобетонних конструкціях мостів, що згинаються, при дії малоциклових навантажень пропонується визначати за формулою (3.85) ДБН В. 2.3 -14 [15] із врахуванням емпіричного коефіцієнта, що враховує дію циклічних навантажень:

$$a_{cr} = \Psi_{cyc}^{cr} \frac{\sigma}{E} \Psi \leq \Delta_{cr}, \quad (4)$$

де  $\Psi_{cyc}^{cr}$  – коефіцієнт, що враховує дію циклічних навантажень і приймається за табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта  $\Psi_{cyc}^{cr}$

Коефіцієнт	Рівень малоциклового навантаження $0,6F_{cr}$	Рівень малоциклового навантаження $0,75F_{cr}$
$\Psi_{cyc}^{cr}$	1,12	1,5

Значення коефіцієнта  $\Psi_{cyc}^{cr}$  отримано із експериментальних даних дослідження базальтобетонних і базальтофібробетонних балок при дії малоциклових навантажень [18]. Оскільки приріст ширини розкриття тріщин в базальтобетонних і базальтофібробетонних балках був співставним, тому використані дані для спільної обробки результатів. В табл. 2 представлено збільшення ширини розкриття тріщин в балках у відсотках.

Таблиця 2

Збільшення ширини розкриття тріщин у відсотках в залежності від рівня навантаження (відносно першого циклу  $0,6F_{cr}$ )

Серія	Зразок	Приріст розкриття тріщини, %		Зразок	Приріст розкриття тріщини, %	
		Після 7 циклів з рівнем $0,6F_{cr}$	Після 10 циклів з рівнем $0,75F_{cr}$		Після 7 циклів з рівнем $0,6F_{cr}$	Після 10 циклів з рівнем $0,75F_{cr}$
		IV	IV-BO1		8,69	30,43
IV-BO2	11,36		31,82	IV-BOф2	17,50	32,50
V	V-BO1	25,93	74,07	V-BOф1	6,25	56,25
	V-BO2	8,57	48,57	V-BOф2	13,33	66,67
VI	VI-BO1	5,88	52,94	VI-BOф1	10,00	70,00
	VI-BO2	8,57	54,29	VI-BOф2	9,68	48,39

В табл. 3 – експериментально визначені коефіцієнти збільшення ширини розкриття тріщин для кожної балки і усереднені дані для відповідних рівнів малоциклових навантажень.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблиця 3

Експериментальні значення коефіцієнта  $\Psi_{\text{сус}}^{\text{erc}}$ 

Серія	Рівень навантаження $0,6F_{\text{cr}}$		Рівень навантаження $0,75F_{\text{cr}}$	
	Балки БО	Балки БОф	Балки БО	Балки БОф
IV	1,10	1,19	1,31	1,34
V	1,17	1,10	1,61	1,61
VI	1,07	1,10	1,54	1,59
Сер. знач.	1,12		1,50	

Вплив малоциклових навантажень на прогини балкових базальтобетонних конструкцій мостів, що згинаються, враховується введенням у формулу (3.92) ДБН В.2.3 – 14 [15] коефіцієнта  $\Psi_{\text{сус}}^f$ :

$$f = \Psi_{\text{сус}}^f \sum \bar{M}(x) \frac{1}{\rho}(x) \Delta x, \quad (5)$$

де  $\bar{M}(x)$  – значення згинального моменту в перерізі  $x$  від тимчасового навантаження, прикладеного в напрямку прогину  $f$ , що визначається;  $\frac{1}{\rho}(x)$  – кривизна елемента в тому ж перерізі під тимчасовим навантаженням;  $\Delta x$  – довжина ділянки з постійним значенням  $\bar{M}(x)$  і  $\frac{1}{\rho}(x)$ ;

$\Psi_{\text{сус}}^f$  – коефіцієнт, що враховує дію циклічних навантажень і приймається за табл. 4.

Таблиця 4

Значення коефіцієнта  $\Psi_{\text{сус}}^f$ 

Коефіцієнт	Рівень малоциклового навантаження $0,6F_{\text{cr}}$	Рівень малоциклового навантаження $0,75F_{\text{cr}}$
$\Psi_{\text{сус}}^f$	1,11	1,46

Значення коефіцієнта  $\Psi_{\text{сус}}^f$  отримано із експериментальних даних дослідження базальтобетонних і базальтофібробетонних балок при дії малоциклових навантажень [18]. Приріст прогинів в базальтобетонних і базальтофібробетонних балках був співставним, тому ці дані були використані для спільної обробки результатів. В табл. 5 представлені експериментально визначені коефіцієнти збільшення про-

гинів для кожної балки і усереднені дані для рівнів малоциклових навантажень.

Виконано порівняння отриманих значень коефіцієнтів  $\Psi_{\text{сус}}^{\text{erc}}$  і  $\Psi_{\text{сус}}^f$  для базальтобетонних балок із аналогічними коефіцієнтами для залізобетонних балок. Балки таких самих розмірів на малоциклові навантаження випробовував Полюга Р. І. (арматура сталеву класу А-III) та Ковальчик Я. І. (попередньо напружена арматура канати К-7) У табл. 6 приведені коефіцієнти  $\Psi_{\text{сус}}^{\text{erc}}$  і  $\Psi_{\text{сус}}^f$  авторів, Полюги Р. І. та Ковальчика Я. І.

Таблиця 5

Експериментальні значення коефіцієнта  $\Psi_{\text{сус}}^f$ 

Серія	Рівень навантаження $0,6F_{\text{cr}}$		Рівень навантаження $0,75F_{\text{cr}}$	
	Балки БО	Балки БОф	Балки БО	Балки БОф
IV	1,06	1,22	1,39	1,54
V	1,09	1,08	1,40	1,53
VI	1,12	1,12	1,47	1,46
Сер. знач.	1,11		1,46	

Таблиця 6

Коефіцієнти  $\Psi_{\text{сус}}^{\text{erc}}$  і  $\Psi_{\text{сус}}^f$  для балок із різною арматурою

Автор	Арматура	$\Psi_{\text{сус}}^{\text{erc}}$		$\Psi_{\text{сус}}^f$	
		$0,6F_{\text{cr}}$	$0,75F_{\text{cr}}$	$0,6F_{\text{cr}}$	$0,75F_{\text{cr}}$
Грибак О. Я.	Базальтопластикова	1,12	1,5	1,11	1,46
Полюга Р. І [6]	А-III	1,18	1,40	-	-
Ковальчик Я. І. [8]	Попередньо напружені канати	1,41	1,59	1,12	1,67

Як видно з представлених результатів балки із базальтопластиковою арматурою при дії малоциклових навантажень мають збільшення ширини розкриття тріщин і прогинів співрозмірне з балками із сталеву арматурою.

Виконано розрахунок прогинів і ширини розкриття тріщин дослідних зразків серії III при дії малоциклових навантажень за формулами ДБН В. 2.3-14 [15] і зроблено порівняння їх з

даними експериментальних досліджень. Як видно із рис. 1, відхилення експериментальних результатів від теоретичних даних становить до 15 % ... 22 %. Виконання розрахунків прогинів за формулою (3.92) ДБН В.2.3 – 14 [15] із врахуванням коефіцієнта  $\psi_{cyc}^f$  (5) і ширини розкриття тріщин за формулою (3.85) ДБН В. 2.3 - 14 [15] із врахуванням коефіцієнта  $\psi_{cyc}^{crc}$  (4) дає теоретичні результати, які значно ближчі до експериментальних, відхилення становить 2,5 % ... 8 %. Це свідчить, що дію малоциклових навантажень на балкові базальтобетонні елементи, що згинаються, можна враховувати використанням формул (3.85) і (3.92) ДБН В.2.3 – 14 [15].

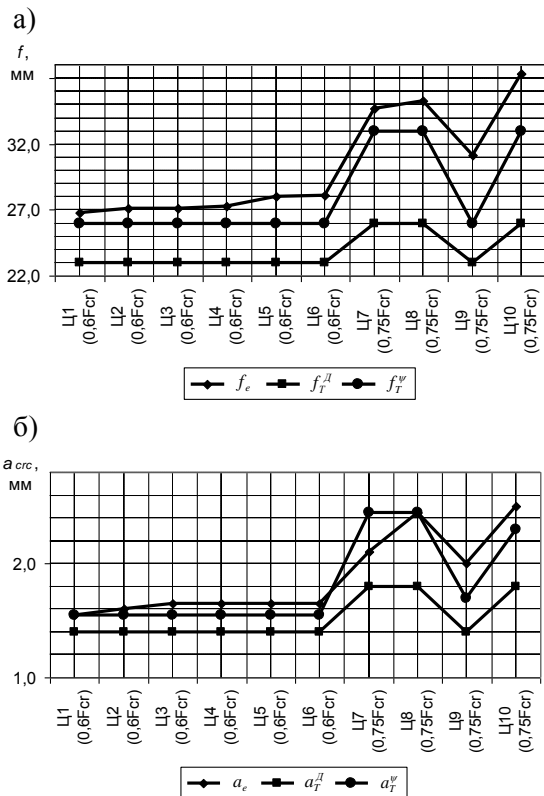


Рис. 1 Максимальні прогини (а) і ширина розкриття тріщин (б) по циклах для базальтобетонних балок серії III

На рис. 1 наведені такі позначки:  $f_e$  – середнє значення прогину за випробуванням двох балок;  $f_T^D$  – розрахункове значення прогину  $f$  згідно з ДБН В.2.3-14;  $f_T^\psi$  – розрахункове значення прогину  $f$  згідно з ДБН В.2.3-14 з врахуван-

ням  $\psi_{cyc}^f$ ;  $a_e$  – середнє значення максимальної ширини розкриття тріщин за випробуванням двох балок;  $a_T^D$  – розрахункове значення ширини розкриття тріщини  $a_{crc}$  згідно з ДБН В.2.3-14;  $a_T^\psi$  – розрахункове значення ширини розкриття тріщини  $a_{crc}$  згідно з ДБН В.2.3-14 з врахуванням  $\psi_{cyc}^{crc}$ .

### Наукова новизна

Вперше запропоновано врахування дії малоциклових навантажень при розрахунку бетонних конструкцій, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою.

### Практична значимість

Врахування дії малоциклових навантажень при розрахунку бетонних конструкцій, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою дає можливість отримати теоретичні прогини і ширини розкриття тріщин, близькі до реальних, що забезпечить проектування таких конструкцій з вищою надійністю.

### Висновки

1. Запропоновано при розрахунку ширини розкриття тріщин базальтобетонних балок враховувати дію малоциклових навантажень високого рівня введенням коефіцієнта  $\psi_{cyc}^{crc}$ , який при повторних навантаженнях рівня  $0,6F_{cr}$  приймається  $\psi_{cyc}^{crc} = 1,12$ , при рівні навантаження  $0,75F_{cr}$   $\psi_{cyc}^{crc} = 1,5$ .

2. Запропоновано при визначенні прогинів базальтобетонних балок враховувати дію малоциклових навантажень високого рівня введенням коефіцієнта  $\psi_{cyc}^f$ , який при повторних навантаженнях рівня  $0,6F_{cr}$  приймається  $\psi_{cyc}^f = 1,11$ , при рівні навантажень  $0,75F_{cr}$   $\psi_{cyc}^f = 1,46$ .

3. Порівняння теоретичних результатів, отриманих за запропонованою методикою розрахунку балкових базальтобетонних конструкцій мостів, що згинаються, за другою групою граничних станів, із експериментальними да-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ними показали хорошу схожимість, що підтверджує можливість використання запропонованої методики.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Давиденко, О. О. Статичний прогноз технічного стану автодорожніх мостів України [Текст] / О. О. Давиденко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2016. – Вип. 10. – С. 4-12.
2. Солдатченко, О. С. Міцність, жорсткість та тріщиностійкість згинальних конструкцій зі склопластиковою і базальтопластиковою композитною арматурою [Текст] : дис. к-та техн. наук : 05.23.01 / Солдатченко Олександр Сергійович ; Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2012. 160 с.
3. ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012. Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу [Текст]. – Надано чинності 2014-04-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. – 28 с.
4. Кустикова, Ю. О. Напряженно-деформированное состояние базальтопластиковой арматуры в железобетонных конструкциях [Текст] / Ю. О. Кустикова, В. И. Римшик // Журнал промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №6. – С. 6-9.
5. Altalmas A., Refai A., Abed F. Bond degradation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to accelerated aging conditions / Construction and Building Materials, 2015, №81, pp. 162-171.
6. Elgabbas F., Ahmed E., Benmokrane B. Development and characterization of basalt FRP reinforcing bars for concrete structures / The 7<sup>th</sup> International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 2014, pp. 1-6.
7. Elgabbas F., Vincent P., Ahmed E., Benmokrane B. Experimental Testing of Basalt-Fiber-reinforced Polymer Bars in Concrete Beams / Composites Part B: Engineering, Vol. 91, 15 april – 2016, pp. 205-218.
8. ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1R-06 – ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2006., 44 p.
9. FIB Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures. – International Federation for Structural Concrete, 2007. 160 p.
10. Коваль, П. М. Робота автодорожніх мостів під дією малоциклових навантажень [Текст] / П. М. Коваль, Р. І. Полюга // Автошляховик України, – 2006. №3. – С. 34-37.
11. Полюга, Р. І. Тріщиностійкість залізобетонних балкових конструкцій автодорожніх мостів в умовах малоциклових навантажень [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Полюга Роман Ігорович. – Львів, 2006. – 160 с.
12. Дорофеев, В. С. Міцність та тріщиностійкість залізобетонних балкових конструкцій за дії малоциклових знакопостійних і знакозмінних навантажень високих рівнів [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карплюк, К. І. Албу, Ю. А. Сьоміна // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2016.. – Вип. 10. – С. 13-26.
13. Стоянович, С. В. Напружено-деформований стан збірно-монолітних попередньо напружених залізобетонних прогонових будов мостів [Текст]: дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Стоянович Сергій Володимирович. – Київ, 2013. – 197 с.
14. Ковальчик, Я. І. Міцність, тріщиностійкість та деформативність попередньо напружених балкових залізобетонних прогонових будов мостів [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Я. І. Ковальчик. – Київ, 2015. – 224 с.
15. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. Надано чинності 2007-02-01. – Київ : Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
16. ДБН В.2.3-22 -2009. Споруди транспорту. Мости і труби. Основні вимоги проектування [Текст].– Надано чинності 2009-11-11 – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 73 с.
17. ДБН В.1.2-15:2009. Мости та труби. Навантаження та впливи [Текст].– Надано чинності 2010-03-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 66 с.
18. Коваль, П. М. Вплив малоциклових навантажень на роботу бетонних балок, армованих базальтопластиковою арматурою [Текст] / П. М. Коваль, О. Я. Гримак // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2016. – Вип. 10. – С. 35-42.

П. М. КОВАЛЬ<sup>1\*</sup>, О. Я. ГРИМАК<sup>2</sup>, С. В. СТОЯНОВИЧ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра архитектурных конструкций, Национальная академия изобразительного искусства и архитектуры, ул. Вознесенский спуск, 20, Киев, Украина, 04053, тел. +38 (044) 272 19 70, эл. почта koval\_pm@meta.ua, ORCID 0000-0002-0040-5900

<sup>2</sup> Кафедра автомобильных дорог и мостов, Национальный университет «Львовская политехника», ул. Степана Бандеры, 12, Львов, Украина, 79000, тел. + 38 (032) 258 21 11, эл. почта grymak5oleg@gmail.com, ORCID 0000-0002-0515-1663

<sup>3</sup> Кафедра архитектурных конструкций, Национальная академия изобразительного искусства и архитектуры, ул. Вознесенский спуск, 20, Киев, Украина, 04053, тел. +38 (044) 272 19 70, эл. почта serhiy\_st1985@meta.ua, ORCID 0000-0002-1363-7356

## УЧЕТ ДЕЙСТВИЯ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ РАСЧЕТЕ БЕТОННЫХ БАЛОК, АРМИРОВАННЫХ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ

**Цель.** Разработать предложения по учету действия малоцикловых нагрузок при расчете изгибаемых бетонных балок, армированных базальтопластиковой арматурой. **Методика.** Предлагается внести дополнение в расчеты по второй группе предельных состояний бетонных конструкций, армированных базальтопластиковой арматурой, используя результаты экспериментальных исследований таких конструкций. **Результаты.** В формулы для определения прогибов и ширины раскрытия трещин введены коэффициенты, полученные экспериментально, учитывающие действие циклических нагрузок различного уровня. Выполнено сравнение экспериментальных и теоретических данных. **Научная новизна.** Впервые предложено учет действия малоцикловых нагрузок при расчете изгибаемых бетонных конструкций, армированных базальтопластиковой арматурой. **Практическая значимость.** Учет действия малоцикловых нагрузок при расчете изгибаемых бетонных конструкций, армированных базальтопластиковой арматурой, обеспечит высокую надежность работы таких конструкций.

**Ключевые слова:** малоцикловые нагрузки; бетонные балки; базальтопластиковая арматура; прогибы; ширина раскрытия трещин

P. M. KOVAL<sup>1\*</sup>, O. YA. HRYMAK<sup>2</sup>, S. V. STOYANOVICH<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Department of Architectural Constructions, National Academy of Fine Arts and Architecture, Voznesenski Uzviz st., 20, Kyiv, Ukraine, 04053, tel. +38 (044) 272 19 70, e-mail koval\_pm@meta.ua, ORCID 0000-0002-0040-5900

<sup>2</sup> Department of Roads and Bridges, National University "Lviv Polytechnic" Stepan Bandera Str., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel. +38 (032) 258 21 11, e-mail grymak5oleg@gmail.com, ORCID 0000-0002-0515-1663

<sup>3</sup> Department of Architectural Constructions, National Academy of Fine Arts and Architecture, Voznesenski Uzviz st., 20, Kyiv, Ukraine, 04053, tel. +38 (044) 272 19 70, e-mail serhiy\_st1985@meta.ua, ORCID 0000-0002-1363-7356

## TAKING INTO ACCOUNT THE ACTION OF LOW-CYCLE LOADS WHEN CALCULATING CONCRETE BEAMS REINFORCED BY BASALT-PLASTIC REINFORCEMENT

**Purpose.** To develop proposals for accounting for action of low-cycle loads in the calculation of bending of concrete beams reinforced with basalt-plastic reinforcement. **Methodology.** It is proposed to make an addition to the calculations of the second group of limit states of concrete constructions reinforced with basalt-plastic reinforcement, using the results of experimental studies of such structures. **Findings.** In the formulas for determining the deflections and the width of the crack opening, the coefficients obtained experimentally are introduced, taking into account the effect of cyclic loads of different levels. A comparison is made between the experimental and theoretical data. **Originality.** For the first time, it was suggested to take into account the effect of low-cycle loads when calculating bent concrete structures reinforced with basalt-plastic reinforcement. **Practical value.** Accounting for the action of low-cycle loads in the calculation of bent concrete structures reinforced with basalt-plastic reinforcement will ensure high reliability of the operation of such structures.

**Keywords:** low-cycle loads; concrete beams; basalt-plastic bars; deflections; crack opening width

### REFERENCES

1. Davydenko O. O. Statychnyi prohnosy tekhnichnoho stanu avtodorozhnykh mostiv Ukrainy [Static forecast of the technical road of the motor roads of Ukraine]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2016, issue 10, pp. 4-12.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

2. Soldatchenko O. S. Mitsnist, zhorstkist ta trishchynostiikist zghynalnykh konstruksii zi skloplastykovoio i bazaltoplastykovoio kompozytnoio armaturoio. Diss. [Strength, rigidity and fission of flexural structures with fiberglass and basalt-plastic composite reinforcement]. Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury. Kyjiv, 2012. 160 p.
3. DSTU-N B V.2.6-185:2012. Nastanova z proektuvannja ta vygotovlennja betonnykh konstrukcij z nemetalevoju kompozytnuju armaturoju na osnovi bazaljtio- i sklorovinghu [Guidelines for the design and manufacture of concrete structures with non-metallic composite reinforcement based basalto- and roving]. Kyjiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2012.
4. Kustykova Yu. O., Rymshyk V. Y. Napriazhenno-deformyrovannoe sostoianye bazaltoplastykovoio armatury v zhelezobetonnykh konstruksiyakh [Stress-strain state of basalt-plastic reinforcement in reinforced concrete structures]. *Zhurnal promyshlennoe y hrzhdanskoe stroytelstvo – Journal of Industrial and Civil Engineering*, 2014, №6, pp. 6-9.
5. Altalmas A., Refai A., Abed F. Bond degradation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to accelerated aging conditions. *Construction and Building Materials*, 2015, №81, pp. 162-171.
6. Elgabbas F., Ahmed E., Benmokrane B. Development and characterization of basalt FRP reinforcing bars for concrete structures. *The 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, 2014, pp. 1-6.
7. Elgabbas F., Vincent P., Ahmed E., Benmokrane B. Experimental Testing of Basalt-Fiber-reinforced Polymer Bars in Concrete Beams. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 91, 15 april 2016, pp. 205-218.
8. ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1R-06 – ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2006, 44 p.
9. FIB Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures. – International Federation for Structural Concrete, 2007. 160 p.
10. Koval P. M., Poliuha R. I. Robota avtorozhnykh mostiv pid diieiu malo tsyklovykh navantazhen [Work of road bridges under the influence of low cycle loads]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy Publ.*, 2006, №3. pp. 34-37.
11. Poliuha R. I. Trishchynostiikist zalizobetonnykh balkovykh konstruksii avtorozhnykh mostiv v umovakh malotsyklovykh navantazhen Diss. [Flexibility of reinforced concrete structures of road bridges in conditions of low cycle loads] Lviv, 2006. 160 p.
12. Dorofieiev V. S., Karpluk V. M., Albu K. I., Somina Yu. A. Mitsnist ta trishchynostiikist zalizobetonnykh balkovykh konstruksii za dii malotsyklovykh znakopostiinykh i znakozminnykh navantazhen vysokyykh rivniv [Strength and crack resistance of reinforced concrete structures for the effect of low-cycle sign-constant and sign-loaded high-level loads]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2016, issue 10, pp. 13-26.
13. Stoianovych S. V. Napruzhenno-deformovanyi stan zbirno-monolitnykh poperedno napruzhenykh zalizobetonnykh prohonovykh budov mostiv. [Stress-deformed state of prefabricated monolithic pre-stressed reinforced concrete runways of bridges]. Kyjiv, 2013. 197 p.
14. Kovalchuk Ya. I. Mitsnist, trishchynostiikist ta deformatyvnist poperedno napruzhenykh balkovykh zalizobetonnykh prohonovykh budov mostiv. Diss. [Strength, crack resistance and deformability of pre-stressed beam reinforced concrete runways of bridges]. Kyjiv, 2015. 224 p.
15. DBN V.2.3-14-2006. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannja* [State Standard V.2.3-14-2006. Transport constructions. Bridges and pipes. Design rule]. Kyjiv, Ministerstvo budivnytstva, arkhitektury i zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Publ., 2006. 359 p.
16. DBN V.2.3-22 -2009. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Osnovni vymoghy proektuvannja* [State Standard V.2.3-22-2009. Constructions of transport. Bridges and pipes. Basic design requirements]. Kyjiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2009. 73 c.
17. DBN V.1.2-15:2009. *Mosty ta truby. Navantazhennja ta vplyvy* [Bridges and pipes. Loads and effects]. Kyjiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2009. 66 p.
18. Koval P. M., Hrymak O. Ya. Vplyv malotsyklovykh navantazhen na robotu betonnykh balok, armovanykh bazaltoplastykovoio armaturoio [Influence of low-cycle loads on the work of concrete beams reinforced with basalt-plasticized reinforcement]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2016, issue 10, pp.35-42.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н, проф. А. С. Дехтяр, д.т.н., проф. А. В. Радкевич

Надійшла до редколегії 18.09.2018.

Прийнята до друку 22.10.2018.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 621.643:[622.691:620.191.33-027.45]

Й. Й. ЛУЧКО\*

\* Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 033 18 36, ел. пошта lychko.diit@mail.ru

### МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ГАЗОПРОВОДУ НА МІЦНІСТЬ, ВТОМНУ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ

**Мета.** Метою роботи є аналіз методів розрахунку та виконати оцінку міцності і втомної тріщиностійкості газопроводу тривалої експлуатації. **Методика.** На основі аналізу сучасних методів розрахунку магістральних трубопроводів на міцність і довговічність та на цій основі сформульована методика комплексної оцінки роботоздатності досліджуваного етиленпроводу, як з позицій класичних критеріїв міцності, так і підходів механіки втомного руйнування, які дозволяють врахувати циклічний характер зміни навантажень у трубопроводі. **Результати.** Одержані результати розрахунків міцності і втомної тріщиностійкості газопроводу тривалої експлуатації за класичними критеріями міцності та оцінки роботоздатності трубопроводів з врахуванням їх дефектності на основі механіки руйнування. Отримані експериментальні дані міцності і тріщиностійкості трубної сталі і її зварних з'єднань газопроводу. На основі комплексу експериментів побудована діаграма втомного руйнування газопроводу. **Наукова новизна.** Автором вперше проведені багатоваріантні експериментальні і теоретичні розрахунки міцності та втомної тріщиностійкості трубної сталі тривало експлуатованих потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів. **Практичне значення.** Одержані результати міцності і втомної тріщиностійкості дозволили удосконалити методичні засади експрес методу оцінки роботоздатності потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів.

*Ключові слова:* магістральний трубопровід; твердість металу; оцінка роботоздатності; трубна сталь; розрахункова і допустимі напруження; коефіцієнт запасу міцності

#### Вступ

Магістральні газопроводи (МГ) відносяться до інженерних споруд підвищеної відповідальності. Змінні високі тиски, велика протяжність трас, складні природно-гідрологічні умови їх проходження та значні економічні втрати при аваріях МГ – все це дає підстави на підвищені вимоги до їх міцності, надійності та довговічності. Досвід тривалої експлуатації потенційно-небезпечних ділянок трубопровідних систем, таких як магістральні газопроводи, вказує на важливість урахування особливостей перерозподілу їх сумарних напружень і деформацій у місцях дефектних ділянок. Сучасні можливості розвитку інженерних розрахунків стосовно забезпечення надійної і безаварійної експлуатації відповідальних вузлів і елементів трубопровідних систем вказує, що злободенною залишається проблема їх контролю міцності та втомної тріщиностійкості і довговічності та водночас забезпечення таких умов перебігу експлуатації, за яких неможливо виникнення (з погляду руйнування) станів МГ. Тому узагальнення досвіду та створення ефективної методики оцінки міц-

ності і втомної тріщиностійкості та формулювання висновків, щодо подальшої експлуатації чи способів ремонту тривало експлуатованих ділянок магістральних газопроводів (трубопроводів) не втрачає актуальності і сьогодні.

Значна частина розгалуженої мережі магістральних трубопроводів України перебуває в експлуатації більше 30 років [5, 7, 9]. Зі збільшенням термінів їх експлуатації все актуальнішою стає проблема ефективної та безперервної роботи трубопровідного транспорту, яка забезпечується організацією періодичної технічної діагностики стану елементів трубопроводів та ремонту в місцях виявлених недопустимих дефектів [1, 2, 4, 8, 12, 14, 15, 18, 20]. В кожному конкретному випадку допустимість виявленого дефекту вимагає комплексного підходу та відповідних обґрунтувань щодо проведення ремонтно-відновлювальних заходів. Однією з важливих складових такого підходу є визначення напруженого стану трубопроводів в конкретних умовах експлуатації, особливо в зонах зварних з'єднань, в яких до напружень, зумовлених дією силових факторів, додаються ще і залишкові

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

технологічні напруження, та оцінка їх впливу на міцність та довговічність ділянок труб з дефектами [3, 5, 6, 10, 11, 13, 16, 17, 19]. Нижче наведено результати експериментальних досліджень матеріалів газопроводу на міцність і втомну тріщиностійкість та методики розрахунку, і їх аналіз.

**Мета**

Метою роботи є оцінка міцності і втомної тріщиностійкості газопроводу тривалої експлуатації та аналіз методів розрахунку.

**Методика**

**Розрахунки за класичними критеріями міцності.** Значний період з 1979 р. були діючими нормативні рекомендації з проведення ремонтно-відновлювальних робіт на газопроводах [5] не допускали їх експлуатацію при наявності наскрізних дефектів труб.

Ділянки із такими дефектами підлягають видаленню, а на їх місце вварюють врізані куски труб. Сама по собі ця операція дуже трудомістка і зв'язана із значними екологічними втратами.

Розрахунок трубопроводів на міцність і довговічність є з однією із найважливіших ланок у формуванні і забезпеченні надійності трубопроводних систем [1, 2]. Тому розвитку і вдосконаленню методів з рахунку постійно надається підвищена увага. На даний час як на Україні, так і в інших країнах існує ряд нормативних документів по розрахунках на міцність, які відображають сучасний рівень знань і технічних можливостей в цій галузі. Так, з січня 1975 р. введено в СНиП II-45-75 по розрахунку і проектуванню магістральних трубопроводів, який замінив діючий раніше СНиП II-Д. 10-62.

Цей нормативний документ узаконив розрахунок на міцність за граничним станом трубопроводу на основі границі міцності матеріалу. В цьому випадку умова міцності вибирається у вигляді

$$\sigma_p \leq \psi[\sigma], \quad (1)$$

де  $\sigma_p$  – максимальні сумарні робочі напруження від всіх діючих силових факторів;  $[\sigma]$  – розрахункове допустиме значення напружень для

матеріалу труби;  $\psi$  – коефіцієнт, який враховує двохосовий напружений стан.

В свою чергу допустимі напруження визначаються за формулою

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B m}{K_1 K_2}, \quad (2)$$

де  $\sigma_B$  – границя міцності матеріалу згідно державних стандартів і технічних умов;  $m$  – коефіцієнт умов роботи трубопроводу;  $K_1$  – коефіцієнт безпеки;  $K_2$  – коефіцієнт надійності.

Коефіцієнт безпеки по матеріалу відображає можливе зменшення границі міцності труб порівняно з його нормативним значенням, можливе зменшення товщини стінки порівняно з номінальною і надійність конструкції труби. Коефіцієнт умов роботи враховує можливу невідповідність вибраної розрахункової схеми реальній конструкції, зокрема особливості взаємодії трубопроводу з зовнішнім середовищем. Окрім того, цей коефіцієнт відображає вплив наслідків руйнування трубопроводів на здоров'я людей, а також на вартість виконання ремонтно-відновлювальних робіт.

Коефіцієнт надійності вперше введений в норми проектування трубопроводів в 1975 році з метою врахування додаткових факторів, зв'язаних із збільшенням діаметрів споруджуваних трубопроводів і робочого тиску продукту. При визначенні сумарних напружень величина  $\sigma_p$  у співвідношенні (1) враховують напруження від всіх видів навантаження, які виникають при спорудженні, випробуванні і експлуатації трубопроводів. Основне навантаження – робочий тиск продукту, який транспортується. При розрахунку необхідно врахувати можливість збільшення цього тиску, вводячи для його оцінки коефіцієнт перенавантаження.

Наступним суттєвим фактором виникнення напружень є температурний перепад в металі стінок труби, який визначається в залежності від температури газу і ґрунту (для підземних трубопроводів) або зовнішнього повітря (для надземних). При розрахунку надземних трубопроводів слід враховувати також вагу труби і продукту.

Крім вказаних факторів, які є основними і діють на будь-якій ділянці трубопроводу, в розрахункові схеми вводяться і інші навантаження в залежності від категорії траси, схеми і ме-

тодів прокладки трубопроводу, природно-кліматичних умов експлуатації і т. ін. Так, при надземній прокладці трубопроводу, характерній для вічномерзлих ґрунтів і різних типів переходів через природні і штучні перешкоди, на нього додатково будуть діяти: реакції опор, снігове навантаження; вітрове навантаження (статичне за рахунок аеродинамічного тиску і динамічне за рахунок взаємодії поривів вітру і зриву вихорів під час обдування труби потоком повітря при певній швидкості вітру).

Для всіх інших схем прокладки необхідно враховувати сили, які виникають при засипці ґрунтом, і реакцію основи траншеї. Ці сили різні при прокладанні трубопроводу на косягах, в горах, на рівнинах з низьким і високим рівнем ґрунтових вод і т.п.

На ділянках трубопроводів, які прокладені на болоті, або на заболочених місцях з високим рівнем ґрунтових вод до вказаних навантажень необхідно додавати ще виштовхувальну силу. На трубопровід прокладений по руслі річки, крім цього діють ще і сили потоку води.

Різні навантаження на магістральні трубопроводи виникають при їх прокладці в горах, оскільки в цьому випадку на напружено-деформований стан впливають як спосіб прокладки (зверху вниз чи знизу вгору) так і властивості ґрунту, який може сприймати повністю або лише частково вагу труби, продукту і засипки. Крім цього, на практиці можливі і інші навантаження, які виникають в особливих випадках (зсуви, вимивання або вивітрювання ґрунту з-під труби і т. ін.).

Нормативний розрахунок за співвідношенням (1) має основне значення для вибору товщини стінки трубопроводу і встановлення допустимої величини тиску продуктів перекачки. Проте він не дозволяє з достатньою надійністю прогнозувати очікуваний ресурс трубопроводу, оскільки не враховує багатьох факторів, які притаманні реальному процесу навантаження матеріалу в стінні трубопроводу при його експлуатації. Одним із найважливіших таких факторів є циклічність навантаження.

Основні несучі елементи магістральних трубопроводів в процесі експлуатації піддаються впливу змінних у часі навантажень. Причиною цих циклічних напружень може бути робота насосних і компресорних станцій; регулярна

зміна температури; вітрове навантаження для надземних трубопроводів і течії води для прокладених по дну рік.

Відомо, що опір матеріалу діючим навантаженням, які систематично змінюють свою величину, суттєво відрізняється від опору цього ж матеріалу статичним навантаженням, причому при циклі ці руйнування відбуваються при значно менших напруженнях, ніж при статиці.

Зниження міцності матеріалу при змінних напруженнях називається втотою матеріалу, а його здатність чинити опір руйнуванню і є основною характеристикою втомної міцності є границя витривалості  $\sigma_R$ , за яку приймається найбільша величині періодичного циклічного напруження, якому матеріал може протидіяти практично безмежно довго без появи втомних тріщин, чи будь-яких інших ознак втомного руйнування. Порівнюючи рівень діючих в конкретній деталі напружень  $\sigma_p$  з границею витривалості  $\sigma_R$  визначають коефіцієнт запасу втомної міцності:

$$\eta = \frac{\sigma_p}{\sigma_R}. \quad (3)$$

Стосовно до трубопроводів оцінка запасу втомної міцності ускладнюється тією обставиною, що в трубі виникає двохосний напружений стан. В цих умовах прийнято використовувати розрахункову залежать Гафа і Поларда, яка має вигляд

$$\frac{1}{\eta^2} = \frac{1}{\eta_\sigma^2} + \frac{1}{\eta_\tau^2}, \quad (4)$$

де  $\eta$  – шуканий коефіцієнт запасу втомної міцності;  $\eta_\sigma$  – запас втомної міцності лише при нормальних напруженнях;  $\eta_\tau$  – лише при дотичних.

Із умов експлуатації іноді наперед відомо, що деталь за час своєї роботи повинна прийняти значно менше число циклів, ніж те, що відповідає границі витривалості. У цьому випадку більш вигідно вести розрахунок на потрібне число циклів, а не виходячи із границі витривалості. При цьому допустимі напруження знаходять наступним чином. По діаграмі втоми матеріалу (залежності числа циклів до руйнування від величини діючих напружень) за заданим значенням циклів навантаження  $N$  знаходять відповідне граничне значення цю величини

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ну можна розглядати як границю витривалості на обмеженій кількості циклів навантаження. Далі допустиме напруження визначають за формулою:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{sp}}{\eta}, \quad (5)$$

де  $\eta$  – прийнятий коефіцієнт втомної міцності.

Іншим варіантом критерій довговічності, особливо для випадків, коли навантаження повільно змінюються з часом і має місце малоциклова втома, є співвідношення

$$\tau = c\sigma^{-B} \exp\left(\frac{u}{kT}\right), \quad (6)$$

де  $\tau$  – час експлуатації до руйнування;  $c$  і  $B$  – характеристики матеріалу;  $u$  – енергія активації;  $k$  – постійна Больцмана;  $T$  – експлуатаційна температура (за абсолютною шкалою);  $\sigma$  – діючі напруження.

Оцінка роботоздатності трубопроводів з врахуванням їх дефектності на основі механіки руйнування. Розглянуті вище підходи до розрахунків на міцність, які базуються на принципах граничного навантаження або допустимих напружень, Безумовно, не вичерпують всіх аспектів можливого руйнування трубопроводів. Зокрема, відомо, що магістральні трубопроводи в ряді випадків можуть вийти з ладу в результаті лавинного (з швидкістю 0,1-0,4 – швидкості звуку в металі) поширення в них тріщин, причому при номінальних напруженнях, значно менших, ніж допустимі (в сенсі розглянутих вище критеріїв статичної і циклічної міцності). Це явище зв'язано з крихким руйнуванням матеріалу. Воно проявляється тоді, коли в конструкції є концентратори напружень, а в самому матеріалі які-небудь дефекти, але система навантаження не дозволяє діючим напруженням релаксувати в момент початку росту тріщини, яка утворюється. Іншими словами, не кожний дефект (в т.ч. і тріщина) приводить до негайного руйнування, оскільки більшість матеріалів має здатність пластично деформуватися в зоні максимальної концентрації напружень навколо дефекту. Цю здатність звичайно ототожнюють з високою тріщиностійкістю матеріалу.

Якщо дефект досить великий і несприятливим чином орієнтований, а локальне напружен-

ня, в якому він знаходиться, має високий рівень, то дефект може викликати нестабільне руйнування, яке швидко розвивається. В цьому випадку можна говорити, що дефект являється критичним.

Дефекти, близькі до критичних, можуть виникати в магістральних трубопроводах уже на стадії виготовлення або монтажу. Типовими дефектами в цьому випадку є дефекти зварки, а також механічні пошкодження що виникають при вантаженні, транспортуванні і зварці труб. Якщо частина із цих дефектів виявиться критичною, то руйнування трубопроводу відбудеться уже при першому навантаженні під час випробувань. Якщо ж дефекти є докритичними, то вони можуть бути пропущені при проведенні неруйнівного контролю труб і тим більше не будуть виявлені при прикладанні пробного тиску. В певних умовах такі дефекти можуть навіть не порушити нормальних умов експлуатації трубопроводу. Тим не менше, існує небезпека, що вони будуть рости під впливом втоми і корозії і, досягнувши через деякий час критичних розмірів, приведуть до остаточного руйнування.

Розглянуте явище безумовно свідчить про недостатність класичних методів розрахунку трубопроводів на міцність лише по пружному чи пластичному стану і необхідність доповнення їх новими методами розрахунку, які враховують закономірності зародження і росту тріщин а також нові характеристики, що відображають властивості матеріалу на цій стадії руйнування.

Методологічною основою такого розрахунку є механіка руйнувань - порівняно новий напрям в науці про міцність матеріалів, який бурхливо розвивається останнім часом [12]. Основні положення механіки руйнування, а також особливості її застосування до проблем, зв'язаних з оцінкою працездатності трубопроводу достатньо детально закладені в попередніх звітах [9]. Тому тут зупинимося лише на загальній схемі цього розрахунку, маючи на меті в наступних розділах викласти конкретні результати, отримані при реалізації цієї схеми.

Отже, розрахунок міцності і довговічності трубопроводу на основі механіки руйнування включає в себе такі основні етапи:

- 1) аналіз умов навантаження і характеру пошкодження етиленопроводу на досліджуваній ділянці;
- 2) розрахунок напружено-деформованого стану труби в зоні дефекту;
- 3) експериментальне визначення характеристик опору руйнуванню тріщиностійкості матеріалу труб;
- 4) оцінка запасу міцності і залишкового ресурсу етиленопроводу на пошкодженій ділянці труби.

Завдання першого етапу полягає у отриманні необхідної вихідної інформації для розрахунку. В першу чергу це дані про умови навантаження трубопроводу з врахуванням всіх діючих силових факторів. Причому для прогнозування ресурсу трубопроводу важливо знати не тільки більш несприятливе поєднання цих факторів (критичний стан), але і характер їх зміни в часі (циклічність навантаження). Розв'язок цієї задачі здійснюється на основі традиційних розрахункових методів [1, 12]. Виходячи із реальної ситуації, розробляється розрахункова схема, яка найбільш повно моделює характерні для даної ділянки особливості навантаження, в рамках цієї схеми визначаються значення всіх силових факторів (внутрішній тиск, розтягуючі і згинаючі зусилля, температурні напруження і т.п.) і по них розраховуються номінальні напруження, до виникають в стінці труби. Вихідні дані повинні містити також по можливості найбільш повну характеристику пошкодження або дефекту труби. Отримання інформації в цьому напрямі базується насамперед на безпосередньому обстеженні пошкодженої ділянки трубопроводу. В ході обстеження встановлюється характер пошкодження (свищі, тріщини, корозійні язви, розшарування матеріалу і т.п.) і найбільш ймовірні причини його виникнення (дефекти зварних швів, механічні пошкодження труб, зовнішня чи внутрішня корозія і ін.). Особливе значення має надійне визначення розмірів дефекту, зокрема, видовжених дефектів – положення їх кінців. Необхідно провести заміри товщини стінки труби як безпосередньо в зоні дефекту, так і в його околі, з метою виявлення можливих відхилень товщини від номінальних значень, що може стати причиною перенавантаження труби. Слід зафіксувати також орієнтацію дефекту по відношенню до розмірів зварних

швів: поздовжніх, зварених в заводських умовах і поперечних (монтажних). Необхідність цього викликана тим, що міцнісні характеристики і тріщиностійкість зварних швів відрізняється від аналогічних значень для основного металу. Окрім того, залишкові напруження, які виникають при зварці, можуть внести додатковий вклад в напруження від зовнішніх зусиль.

Дані, які отримані на першому етапі, складають основу розрахункової схеми, що зводить визначення міцності етиленопроводу до розв'язку деякої модельної задачі для труби (циліндричної оболонки) з конкретним дефектом і при заданих умовах навантаження. Другий етап розрахунку полягає в дослідженні напружено-деформованого стану в околі дефекту і визначенні розрахункових параметрів, які контролюють цей стан (коефіцієнтів інтенсивності напружень, розкриття тріщини і ін.). Для дефектів достатньо простої конфігурації в літературі відомі розв'язки в замкнутому вигляді (тобто записані в вигляді конкретних аналітичних співвідношень). Зокрема, для найбільш типового витягнутого дефекту довжиною  $2l$ , розміщеного в поздовжньому перерізі труби величина коефіцієнта інтенсивності напружень у відповідності з даними [7] визначається залежністю:

$$K_i = \sqrt{\pi l} \cdot \left\{ \left[ \sigma_p \left( 1 + \frac{5\pi}{64} \chi \right) + \sigma_m \frac{\sqrt{1-\mu^2} \chi^2}{\sqrt{3(3+\mu)}} \right] \cdot \left[ \frac{5+37\mu}{96(1+\mu)} + \frac{1+5\mu}{16(1-\mu)} \left( 0,577 + \ln \frac{\chi}{4} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

де  $\chi^2 = 12(1-\mu^2)l^4 / R^2h^2$ ;  $R$  – радіус труби;

$h$  – товщина стінки;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\sigma_p$  – розтягуючі напруження;  $\sigma_m$  – згинаючі напруження.

Для тонкостінної труби під дією внутрішнього тиску силові розтягуючі напруження мають значення

$$\sigma_p = \rho \frac{R-h}{h}; \quad \sigma_m = 0. \quad (8)$$

Формула (7) набуває вигляду

$$K_1 = \rho \sqrt{\pi l} \frac{R-h}{h} \left( 1 + \frac{5\pi}{64} \chi^2 \right). \quad (9)$$

У більш складних випадках, особливо при визначенні характеристик нелінійної механіки руйнування (розкриття тріщини), відомі методи розв'язку вимагають, як правило, додаткової числової реалізації при заданих значеннях розрахункових параметрів.

Наступний (третій) етап розрахунку полягає у експериментальному визначенні характеристик опору руйнуванню матеріалу труби. Методики і результати цих досліджень викладені в наступній главі цього звіту. Тут лише відмітимо, що основна трудність досліджень полягає в тому, щоб при визначенні вказаних параметрів максимально врахувати реальні умови навантаження матеріалу в трубопроводі, приймаючи до уваги всі фактори, які можуть вплинути на процес розрахунку тріщин. Найбільш суттєвими такими факторами є асиметрія циклу навантаження, частота, температура зовнішнього середовища і ін. При плануванні експерименту для вказаних параметрів вибираються такі значення, які відповідають експлуатаційним умовам.

При випробовуванні високопластичних матеріалів характеристики тріщиностійкості можуть залежати також і від розмірів зразків. Як правило, найбільш суттєве значення в цьому випадку має товщина зразка. Неконтрольованого впливу цього фактора можна позбутися, або хоча б значно зменшити його, якщо зразки для випробовувань вирізати безпосередньо із відрізків труб даного сортаменту, приймаючи товщину зразка рівною товщині труби. В цих умовах вдається в процесі експерименту моделювати особливості руйнування труб, зокрема, розвиток пластичних зон при рості тріщини.

Необхідно також врахувати, що матеріал трубопроводів, який довгий час знаходився в експлуатації, змінює свої початкові фізико-механічні властивості. Під дією статичних і циклічних навантажень відбувається деформаційне старіння трубних сталей, яке проявляється в локальному окришенні матеріалу а, отже, в зниженні стійкості труб до крихкого руйнування. Саме цим явищем насамперед пояснюється наростаюче збільшення аварійних пошкоджень трубопроводів із збільшенням терміну їх експлуатації. Тому для отримання об'єктивних даних про реальні характеристики трубної сталі

на даний момент, бажано проводити випробування на зразках, вирізаних безпосередньо із досліджуваного трубопроводу.

Отримані на попередніх етапах розрахунку дані про експлуатаційну навантаженість і дефектність трубопроводу, розрахункові залежності для визначення параметрів руйнування і значення характеристик рідностійкості трубних сталей дозволяють перейти безпосередньо до дослідження несучої здатності і довговічності трубопроводу. Для цього необхідно насамперед оцінити небезпечність розглядуваного поєднання, тобто встановити умови, при яких можливий його перехід; нестабільний стан (остаточне руйнування). У відповідності з критеріями лінійної механіки руйнування така ситуація наступить, коли величина коефіцієнту інтенсивності напружень у вершині дефекту досягне критичного для даного матеріалу значення:

$$K_1 = K_{1c}. \quad (10)$$

Використовуючи цю залежність, можна знайти значення руйнуючого тиску  $P$ , яке відповідає даному розміру дефекту  $l$ , а також визначити коефіцієнт запасу міцності трубопроводу за умовою статичного граничного навантаження:

$$n_p = \frac{P^*}{P_{max}}, \quad (11)$$

де  $P_{max}$  – максимальний робочий тиск газу.

Якщо то це значить, що трубопровід ще зберігає несучу здатність, проте його руйнування може відбутися через деякий час внаслідок підростання дефекту. В цьому випадку важливе значення має оцінка періоду стійкого (стабілізованого) підростання дефекту до досягнення ним критичного розміру. Для розв'язку цієї задачі використовується диференціальне рівняння кінетики втомного руйнування, яке має вигляд [12]:

$$\frac{dl}{dN} = v(K_1), \quad (12)$$

де  $v(K_1)$  – залежність швидкості росту тріщини від величини коефіцієнта інтенсивності напружень у її вершині, яка для даного матеріалу і даних умов навантаження визначається кінетичною діаграмою втомного руйнування;  $N$  – число циклів навантаження;  $l$  – біжучий, а  $l_0$  –

початковий розмір дефекту.

Інтегруючи рівняння (12), отримаємо для розрахунку числа циклів навантаження до повного руйнування, таку залежність:

$$N_* = \int_{l_0}^{l_*} \frac{dl}{v(K_1)}, \quad (13)$$

де  $l$  – критичний розмір дефекту, який визначається із критичного співвідношення

$$K_1 = (l_* P_{\max}) = K_{1e}. \quad (14)$$

Очевидно, що значенню  $N$  відповідає час

$$\tau_* = \frac{N_*}{\omega}, \quad (15)$$

де  $\omega$  – середня частота пульсацій тиску при даному режимі перекачки газу.

Значення  $\tau_*$  визначає залишковий ресурс трубопроводу, тобто час протягом якого даний дефект ще не приведе до повного обриву.

### Результати

**Міцність і тріщиностійкість трубної сталі і її зварних з'єднань.** Для прогнозування довговічності етиленопроводу необхідно мати достовірні дані про властивості міцності трубної сталі і її зварних з'єднань при експлуатаційному навантаженні. Ці властивості характеризуються такими основними параметрами:

- механічними характеристиками (границя міцності, границя текучості, відносне видовження та звуження);
- кривою втомної міцності (діаграмою Велера) і параметрами, що її описують;
- кінетичною діаграмою втомного руйнування, яка відображає закономірності росту втомних тріщин і відповідними характеристиками циклічної тріщиностійкості.

Для визначення вказаних параметрів і був реалізований комплекс експериментальних досліджень. Випробування проводили з фрагмента труби, який використовувався при ремонті етиленопроводу Калуш - границя Угорщини на зразках, вирізаних безпосередньо із переданого замовником матеріалу труби - сталь 20.

Використовувалися три типи зразків:

- циліндричні ( $d_o = 5$  мм) – для дослідження механічних характеристик при статичному розтягу;
- плоскі з робочою частиною (5×10 мм) - для випробувань на втому;
- квадратні (компактні) розміром 30×30×5 мм – для дослідження на циклічну тріщиностійкість.

Втомні характеристики визначали як для основного матеріалу, так і для зони термічного впливу зварного шва, яким приварений бандаж до основної труби. Для імітації цього шва на поверхню труби приварювали пластину, попередньо вирізану із цієї труби, після чого пластину знову зрізали і вирізали зразки таким чином, щоб робоча частина співпадала з зоною шва. Технологічна карта розкрою труби на зразки представлена на рис. 1.

**Механічні і втомні характеристики трубної сталі.** Механічні характеристики статичної міцності сталі визначали на гладких циліндричних зразках (рис. 2). У відповідності з вимогами ГОСТ 1497-84 [4].

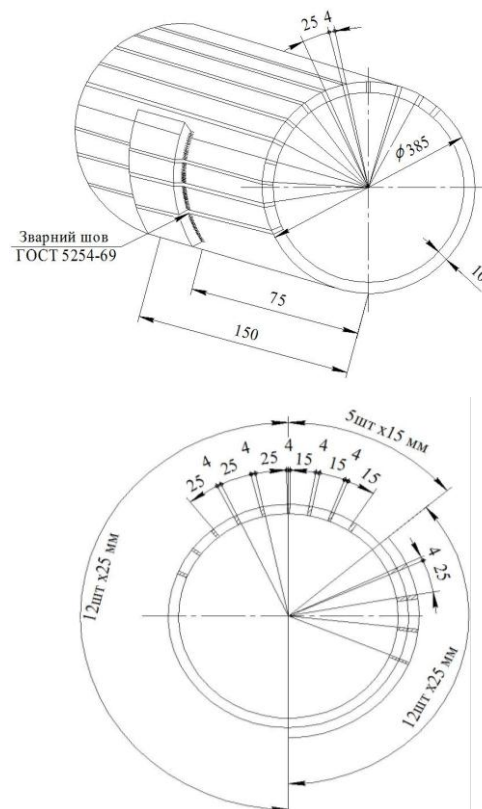


Рис. 1. Карта розкрою труби на зразки

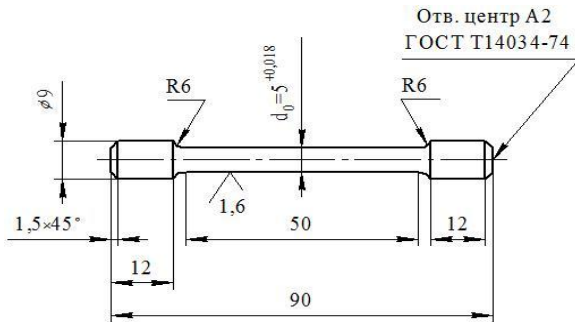


Рис. 2. Циліндричний зразок для випробування на статичний розтяг

1. Для навантаження зразків використовували розривну машину ГР-100 обладнану пристроєм для запису діаграми розтягу. Розміри зразків до і після розриву заміряли мікрометром та штангенциркулем. По даних випробувань трьох зразків отримано такі характеристики:

- границя міцності  $\sigma_B$  – 460 МПа;
- границя текучості  $\sigma_T$  – 300 МПа;
- відносне видовження  $\delta = 32\%$ ;
- відносне звуження  $\psi = 60\%$ .

Випробування на втомну міцність проводили на плоских зразках (тип IV згідно ГОСТ 2860-65) з прямокутним перерізом  $b \times t = 10 \times 5$  мм (рис. 3).

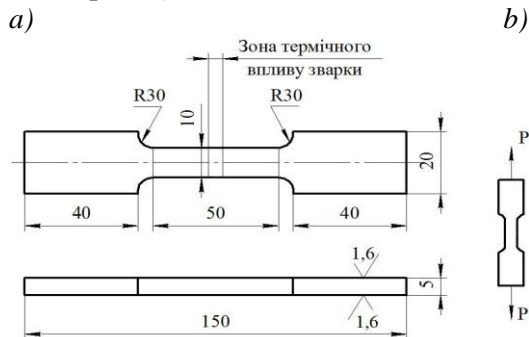


Рис. 3. Зразок для випробувань на втому

Навантаження зразків по схемі осевого розтягу здійснювали на універсальній машині УРС-20-20, яка забезпечує циклічне навантаження з даною частотою, амплітудою і асиметрією і обладнана апаратурою для контролю параметрів навантаження і кількості циклів навантаження. Випробування проводили при законостійному циклі навантаження з асиметрією  $R = 0,1$  і з частотою 20 Гц. Кожний зразок навантажували безпосередньо до руйнування, або до базового числа циклів  $N = 10^7$ . Напруження

для першого зразка приймали рівним границі текучості  $\sigma = 300$  МПа. Величину напружень у наступних зразках вибирали залежно від довговічності попередніх з поступовим зменшенням амплітуди до границі втоми  $\sigma_R$ .

Результати випробувань приведені в таблиці 1. На основі цих даних побудована діаграма втоми (крива Велера) (рис. 4), яка відображає залежність числа циклів навантаження до руйнування зразка від рівня прикладених до нього напружень.

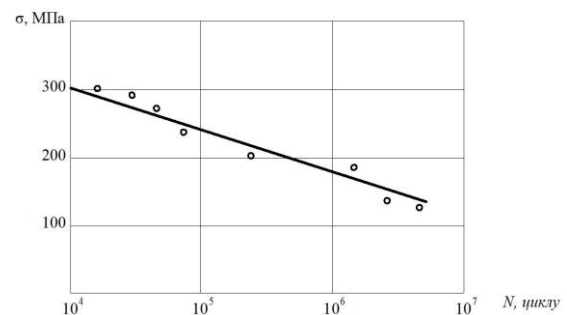


Рис. 4. Діаграма втоми

**Циклічна тріщиностійкість матеріалу етиленпроводу.** Сутність випробувань по визначенню характеристик циклічної тріщиностійкості сталей полягає у послідовному вимірюванні при заданих параметрах циклу навантаження зразка розміру ростучої тріщини і числа циклів навантаження [11].

На основі отриманих даних:

- будують графіки росту тріщини, тобто залежності її довжини від числа циклів навантаження;

- визначають швидкість росту тріщини

$$V = \frac{dl}{dN} = \frac{\Delta l}{\Delta N}$$
 як середній приріст її довжини за один цикл при заданих умовах випробування;

- встановлюють залежність швидкості росту тріщини від величини коефіцієнту інтенсивності напружень, яка характеризує локальний напружено-деформований стан біля вершини тріщини і визначають параметри цієї залежності – характеристики циклічної тріщиностійкості.

Залежність швидкості тріщини від найбільшого за цикл коефіцієнту інтенсивних напружень  $K_{I_{max}}$  або його розмаху  $\Delta K_I$  представляє собою кінетичну діаграму втомного руйнування, яка дає найбільш повну інформацію про

здатність матеріалу чинити опір поширенню втомних тріщин. По діаграмі встановлюються такі основні характеристики циклічної тріщиностійкості:

- пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_m$  - максимальне значення найбільшого коефіцієнту напружень циклу, при якому тріщина не розвивається на протязі даного числа циклів навантаження;
- критичний коефіцієнт інтенсивності  $K_{fc}$  - значення  $K_{max}$ , при якому наступає злом зразка;
- параметри залежності  $V = CK_1^n$ , що апроксимують середню ділянку діаграми.

Для побудови кінетичної діаграми втомного руйнування трубної сталі етиленопроводу використовувалася силова схема розтягу компактного зразка з боковою тріщиною (рис. 5). Дослідження проводили на випробувальній машині ІДМПУ - 10, обладнаною системою вимірювання для контролю найбільшого і найменшого значення навантаження в циклі і кількості циклів навантаження. Довжину тріщини вимірювали по її сліду на поверхні зразка катетометром КМ-8 з точністю 0,01 мм.

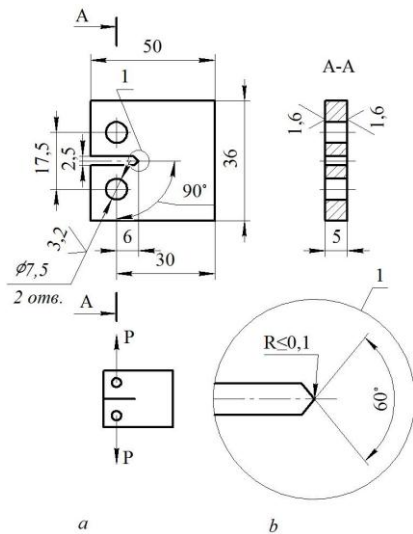


Рис. 5. Компактний зразок для випробувань на циклічну тріщиностійкість

За даними послідовного вимірювання довжини втомної тріщини, навантаження  $P$  на зразку і числа циклів навантаження  $N$  визначали:

- величину коефіцієнта інтенсивності напружень

$$K_{I_{max}} = \frac{P\sqrt{\varepsilon}}{t\sqrt{b}} \psi(\varepsilon), \quad (16)$$

де  $t, b$  – розміри зразка;  $\varepsilon = l/b$  – відносна довжина тріщини;  $\psi(\varepsilon)$  – поправочна функція, яка для даної схеми навантаження і типу зразка має вигляд:

$$\psi(\varepsilon) = \frac{2+\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)^3}} (0,886 + 4,64\varepsilon - 13,32\varepsilon^2 + 14,72\varepsilon^3 - 5,60\varepsilon^4) \quad ; \quad (17)$$

- приріст втомної тріщини на  $i$ -тому етапі між двома послідовними вимірюваннями

$$\Delta l_i = l_i - l_{i-1}; \quad (18)$$

- число циклів навантаження між двома послідовними вимірюваннями

$$\Delta N_i = N_i - N_{i-1}; \quad (19)$$

- швидкість росту тріщини

$$V = \frac{\Delta l_i}{\Delta N_i} \quad (20)$$

Отримана кінетична діаграма втомного руйнування для досліджуваного матеріалу в подвійних логарифмічних координатах представлена на рис. 6.

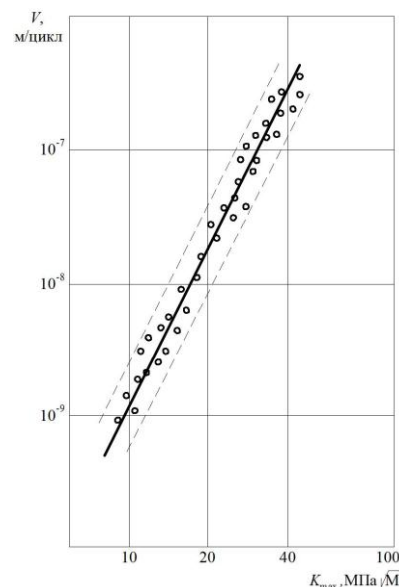


Рис. 6. Кінетична діаграма втомного руйнування: сталь 20;  $R=0,1$ ;  $C=1,097 \cdot 10^{-13} \text{ м}/(\text{МПа}\sqrt{\text{М}})^{4,04}$ ,  $n=4,04$

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Характеристики циклічної тріщиностійкості мають такі значення: пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{th} = 7 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ ; критичний  $K_{fc} = 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$ ; параметри, які описують середню ділянку діаграми співвідношен-

ням  $V = CK_1^n$ ,  $C = 1,1 \cdot 10^{-13} \text{ м}/(\text{МПа}\sqrt{\text{М}})^{4,04}$ ,  $n = 4,04$ . Результати випробувань приведені в табл. 1.

Таблиця 1

## Результати випробувань зразків на втому

№ зразка	$P$ , кг	$\sigma_{\max}$ , МПа	$N$ , цикл	$\lg N$
1	765	300	$1,58 \cdot 10^4$	4,20
2	740	290	$2,85 \cdot 10^4$	4,45
3	700	275	$4,57 \cdot 10^4$	4,66
4	610	240	$7,24 \cdot 10^4$	4,86
5	520	205	$2,52 \cdot 10^5$	5,40
6	470	185	$1,45 \cdot 10^6$	6,16
7	345	135	$2,51 \cdot 10^6$	6,40
8	320	125	$4,36 \cdot 10^6$	6,64

## Наукова новизна та практична значимість

Автором вперше проведені багатоваріантні експериментальні і теоретичні розрахунки міцності та втомної тріщиностійкості трубної сталі тривало експлуатованих потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів. Вперше реалізовано комплекс експериментальних досліджень з визначення механічних і втомних характеристик міцності і циклічної тріщиностійкості трубної сталі тривало експлуатованих газопроводів. Побудова діаграми втомного руйнування яка необхідна для оцінки міцності, втомної тріщиностійкості і довговічності.

## Висновки

1. Зроблено огляд і аналіз сучасних методів розрахунку магістральних трубопроводів на міцність і довговічність і на цій основі запропонована методика комплексної оцінки роботоздатності досліджуваного етиленопроводу як з традиційних позицій класичних критеріїв міцності, так і підходів механіки втомного руйнування, які дозволяють враховувати циклічний характер зміни навантажень в трубопроводі, а також наявність в ньому конструктивних кон-

центраторів напружень, дефектів матеріалу і втомних пошкоджень труб.

2. Реалізовано комплекс експериментальних досліджень по визначенню механічних і втомних характеристик, циклічної тріщиностійкості трубної сталі та побудована діаграма втомного руйнування для сталі 20, необхідних для проведення розрахунків етиленопроводу на міцність і довговічність.

3. Надійність роботи підземних газопровідних систем в значній мірі залежить від рівномірного прилягання трубопроводу до ґрунтової основи. Аналіз відмов у роботі трубопроводів свідчить, що аварійний стан виникає в більшості випадків на тих ділянках де не виконуються необхідні вимоги. Наявність пустот під трубою призводить до перерозподілу діючих на неї зусиль, втрати стійкості і руйнування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Айнбіндер, А. Б. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость [Текст] / А. Б. Айнбіндер, А. Г. Камерштейн // Справочное пособие. – Москва : Недра, 1982. – 343 с.
2. Бородавкин, П. П. Прочность магистральных трубопроводов [Текст] / П. П. Бородавкин, А. М. Синюков. – Москва : Недра, 1984. – 245 с.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

3. Бородавкин П. П. Трубопроводы в сложных условиях [Текст] / П. П. Бородавкин, В. Д. Таран. – Москва : Недра, 1968. – 304 с.
4. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение [Текст]. – Введ. 1986-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 24 с.
5. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках [Текст]. – Введ. 1984-01-07. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 24 с.
6. ГОСТ 25-502-79. Методы механических испытаний на усталость [Текст]. – Введ. 1981-01-07. – Москва : Изд-во стандартов, 1982. – 21 с.
7. Дарчук, О. І. Розрахункова схема трубопроводу підсиленого бандажем [Текст] / О. І. Дарчук, Й. Й. Лучко, В. А. Зозуляк // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів : Каменяр, 1998.– Вип. 3.– с. 584–593.
8. Егерман, Г.Ф. Ремонт магистральных газопроводов [Текст] / Г. Ф. Егерман, М.Д. Джафаров, Е. А. Никитенко. – Москва : Недра, 1973. – 288 с.
9. Обстеження і розробка методичних рекомендацій по експлуатації етиленпроводу Калуш – границя Угорщини [Текст] : звіт НДР (заклучний), госпдоговір № 1947 від 01.04.1990 р. // ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України Львів : 1992. – 65 с.
10. Маруха В. І. Механіка руйнування та міцність матеріалів / В. І. Маруха, В. В. Панасюк, В.П. Силованюк //.– Львів, 2009. – Т. 12.– 261 с.
11. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. РД 50-345-82 [Текст]. – Москва : Изд-во стандартов. – 1983.
12. Механика разрушения и прочность материалов: Справ, пособие. В 4 т. [Текст] / Под общей ред. Панасюка В. В. // – Киев : Наук, думка, – 1988.
13. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок [Текст]. – Москва : Металлургия, 1973. – 408 с.
14. Правила капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов (ВСН2-182-79) [Текст]. – Москва : Мингазпром, 1979.
15. Правила капитального ремонта линейной части магистральных трубопроводов /ВСН2-112-79/ [Текст]. – Москва : Мингазпром, 1979.
16. Методика определения характеристик трещиностойкости тонкостенных сосудов и нефтепроводов. Руководящий документ [Текст]. – Уфа : ВНИИСПТнефть, 1968. – 54 с.
17. Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. [Текст] / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. – Киев : Наук, думка, 1967. – 1304 с.
18. Фалькевич, А. С. Прочность и ремонт сварных резервуаров и трубопроводов [Текст] / А. С.Фалькевич, М. Л. Анучкин. – Москва : Гостоптехиздат, 1956. – 149 с.
19. Этиленопровод госграница ВНР-СССР – Калушский химико-металлургический комбинат. Технический проект. Т. 2, кн. 3. Линейные работы и сооружения [Текст]. – Киев : Книги про трубопровод, 1972. – 254 с.
20. Folias E. S. On the theory of fracture of curved sheets. – End. Fract. Mech. – 1970. – №2 – pp. 151–164.

И. И. ЛУЧКО\*

\* Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (097) 033 18 36, эл. почта lychko.diit@mail.ru

## МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ГАЗОПРОВОДА НА ПРОЧНОСТЬ, УСТАЛОСТНУЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

**Цель.** Целью работы является анализ методов расчета и выполнить оценку прочности и усталостной трещиностойкости газопровода длительной эксплуатации. **Методика.** На основе анализа современных методов расчета магистральных трубопроводов на прочность и долговечность и на этой основе сформулирована методика комплексной оценки работоспособности исследуемого этиленпровода, как с позиций классических критериев прочности, так и подходов механики усталостного разрушения, которые позволяют учесть циклический характер изменения нагрузок в трубопроводе. **Результаты.** Полученные результаты расчетов прочности и усталостной трещиностойкости газопровода длительной эксплуатации по классическим критериям прочности и оценки работоспособности трубопроводов с учетом их дефектности на основе механики

© Й. Й. Лучко, 2018

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

разрушения. Полученные экспериментальные данные прочности и трещиностойкости трубной стали и ее сварных соединений газопровода. На основе комплекса экспериментов построена диаграмма усталостного разрушения газопровода. **Научная новизна.** Автором впервые проведены многовариантные экспериментальные и теоретические расчеты прочности и усталостной трещиностойкости трубной стали продолжалось эксплуатируемых потенциально опасных участков магистральных трубопроводов. **Практическое значение.** Полученные результаты прочности и усталостной трещиностойкости позволили усовершенствовать методические основы экспресс метода оценки работоспособности потенциально опасных участков магистральных трубопроводов.

*Ключевые слова:* магистральный трубопровод; твердость металла; оценка работоспособности; трубная сталь; расчетная и допускаемые напряжения; коэффициент запаса прочности

J. LUCHKO\*

\* Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 033 18 36, e-mail lychko.dii@mail.ru

## METHODS OF CALCULATION AND RESEARCH OF GAS PIPELINE MATERIALS FOR STRENGTH, FATIGUE CRACK RESISTANCE

**Purpose.** The aim of the paper is to analyze the calculation methods and to assess the strength and fatigue crack resistance of a long-term gas pipeline **Methodology.** On the basis of the analysis of modern methods for calculating the main pipelines for strength and durability, and on this basis, a methodology for the integrated evaluation of the operability of the ethylene conductor was formulated, both from the standpoint of the classical strength criteria and fatigue fracture mechanics approaches that allow for the cyclic nature of load changes in the pipeline. **Findings.** The results of calculating the strength and fatigue crack resistance of a long-term gas pipeline according to the classical strength criteria and evaluation of the efficiency of pipelines, taking into account their defectiveness on the basis of fracture mechanics. The obtained experimental data on the strength and crack resistance of pipe steel and its welded gas pipeline joints. Based on the complex of experiments, a diagram of the fatigue fracture of the gas pipeline was constructed. **Originality.** The author for the first time carried out multivariate experimental and theoretical calculations of the strength and fatigue crack resistance of pipe steel of continually operated potentially dangerous sections of main pipelines. **Practical value.** The obtained results of strength and fatigue crack resistance made it possible to improve the methodological basis of the rapid method for assessing the operability of potentially hazardous sections of main pipelines.

*Keywords:* pipeline; reservoir; strength; pipe steel; rated and permissible stresses; safety factor

### REFERENCES

1. Aynbinder A. B., Kamershtejn A. G. Raschet magistralnykh truboprovodov na prochnost i ustoychivost [Calculation of trunk pipelines for strength and stability]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 343 p.
2. Borodavkin P. P., Sinjukov A. M. Prochnost magistralnykh truboprovodov [Strength of main pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 245 p.
3. Borodavkin P. P., Taran V. D. *Truboprovody v slozhnykh usloviyakh.* [Pipelines in difficult conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 304 p.
4. *GOST 1497-84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie.* [State Standard 1497–84. Metals. Methods of tensile testing]. Moscow, Standartinform Publ., 1985.
5. *GOST 25859-83. Sosudy i apparaty stalnye. Normy i metody rascheta na prochnost pri malotsiklovyykh nagruzkakh* [State Standard 25859-83. Vessels and apparatuses are steel. Norms and methods for calculating strength for low-cycle loads]. Moscow, Standartinform Publ., 1984.
6. *GOST 25-502-79. Metody mekhanicheskikh ispytaniy na ustalost.* [State Standard 25-79. Methods of mechanical fatigue tests]. Moscow, Standartinform Publ., 1982.
7. Darchuk O. I., Luchko J. J., Zozuljak V. A. Rozrakhunkova skhema truboprovodu pidsylenogho bandazhem. [Design scheme of the pipeline reinforced bandage] *Mekhanika i fizyka rujnuvannja budivelnykh materialiv i konstrukcij. FMI Karpenka NAN Ukraine.* Lviv, 1998. issue. 3. pp. 584–593.
8. Yegerman G. F., Dzhafarov M.D., Nikitenko Ye. A. *Remont magistralnykh gazoprovodov* [Repair of gas mains]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 288 p.

9. *Zvit na temu: Obstezhennja i rozrobka metodychnykh rekomendacij po ekspluataciji etylenprovodu Kalush-ghranycja Ughorshhyny* [Inspection and development of guidelines for the operation of the Kalush-Hungarian pipeline]. Lviv, 1992, 65 p.
10. Marukha V. I. *Mekhanika rujnuvannja ta micnistj materialiv* [Mechanics of fracture and strength of materials]. Lviv, 2009, vol. 12. 261 p.
11. *Metodicheskie ukazaniya. Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoykosti (vyazkosti razrusheniya) pri tsiklicheskom nagruzenii. RD 50-345-82* [Methodical instructions. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. Determination of fracture toughness characteristics (fracture toughness) under cyclic loading. RD 50-345-82]. Moscow, Standartinform Publ., 1983.
12. Panasyuk V. V *Mekhanika razrusheniya i prochnost materialov* [Mechanics of failure and strength of materials]. Kyjiv, Naukova dumka Publ., 1988.
13. *Normy rascheta na prochnost elementov reaktorov, parogeneratorov, sosudov i truboprovodov atomnykh elektrostantsiy, opytnykh i issledovatel'skikh yadernykh reaktorov i ustanovok* [Norms for calculating the strength of elements of reactors, steam generators, vessels and pipelines of nuclear power plants, experimental and research nuclear reactors and installations]. Moscow, Metalurgiya Publ., 1973. 408 p.
14. *VSN2-182-79 Pravila kapitalnogo remonta lineynoy chasti magistralnykh gazoprovodov* [VSN2-182-79 Rules of overhaul of the linear part of the main gas pipelines]. Moscow, Mingazprom Publ., 1979.
15. *VSN2-112-79 Pravila kapitalnogo remonta lineynoy chasti magistralnykh truboprovodov* [VSN2-112-79 Rules for overhauling the linear part of the main pipelines]. Moscow, Mingazprom Publ., 1979.
16. *Rukovodyashchiy dokument. Metodika opredeleniya kharakteristik treshchinostoykosti tonkostennykh sosudov i nefteprovodov* [Guidance document. Technique for characterizing the fracture toughness of thin-walled vessels and oil pipelines]. Ufa, 1968. 54 p.
17. Troshchenko V. T., Sosnovskiy L. A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov* [Resistance to fatigue of metals and alloys.]. Kyjiv, Nauk dumka Publ., 1967. 1304 p.
18. Falkevich A. S., Anuchkin M. L. *Prochnost i remont svarnykh rezervuarov i truboprovodov*. [Strength and repair of welded tanks and pipelines]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1956. 149 p.
19. *Etilenoprovod gosgranitsa VNR-SSSR – Kalushskiy khimiko-metallurgicheskij kombinat. Tekhnicheskij projekt. T. 2, kn. 3. Lineynye raboty i sooruzheniya*. [Ethylene pipeline state border of Hungary-USSR - Kalush Chemical-Metallurgical Combine. Technical project]. Kyjiv, Books about the pipeline Publ., 1972. 254 p.
20. Folias E. S. On the theory of fracture of curved sheets. *End. Fract. Mech.* 1970. №2. pp. 151–164.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н, доц. О. Л. Тют'якін, д.т.н., проф. Г. І. Гайко

Надійшла до редколегії 26.09.2018.

Прийнята до друку 22.10.2018.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.042:001.891(477.63)

В. В. КУЛЯБКО\*

\* Кафедра металлических, деревянных и пластмассовых конструкций, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а. г. Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (056) 745-23-72

### КАК «ВВЕСТИ В РЕЗОНАНС» ВСЕМИРНО ИЗВЕСТНЫЕ НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ ДНЕПРА ДЛЯ ПОДЪЕМА ИНЖЕНЕРНОГО ПРЕСТИЖА ГОРОДА

**Цель.** В статье предлагается обсудить возможности использования сегодня достижений и стиля работ ученых Днепра с целью некоторого сближения ученых, занимающихся сложными задачами динамики различных конструкций и объектов, а также развитием молодых ученых. **Методика** такого анализа направлена на поиск и организацию творческих специалистов, которые смогут передать молодежи успехи исторических научных школ городских корифеев динамики XX века по созданию фундаментальных основ динамики конструкций различных объектов и отраслей. В частности, показаны преимущества (по сравнению с МКЭ) и эффективность метода прямых при решении нелинейных задач динамики во временной области. Для изучения и распространения результатов, которые можно использовать в смежных областях по статическим и динамическим расчетам и испытаниям, описаны успехи школы В. А. Лазаряна по скоростному наземному транспорту и Н. Г. Бондаря по динамике мостов, школ М. К. Янгеля, В. И. Моссаковского и др. К безусловной **научной новизне** можно отнести приведенные в статье конкретные направления улучшения расчетов и практических приемов моделирования динамики нелинейных механических систем, учтены различные взаимодействия их подсистем, сред и связей. В ближайшее время возможно участие города в строительстве и эксплуатации объектов типа HyperLoop, канатной пассажирской дороги, новых участков и станций метро. В связи с этим в работе обоснована необходимость развития лабораторий динамики конструкций (ЛДК), создания (с коллабораторами) и применения эффективного программного обеспечения, уточнения расчетных методов и моделей объектов, а также повышения роли экспериментальной механики и диагностики состояния конструкций. Даются практически значимые организационные предложения по расширению сети ЛДК и по новым путям динамических способов формообразования конструкций и сооружений, снижения колебаний, паспортизации, мониторинга и поиска повреждений.

**Ключевые слова:** динамика сооружений; динамические расчеты и испытания конструкций, зданий, мостов; образование

#### Введение

В работе 6-й международной научно-практической конференции по мостам и тоннелям, запланированной на осень 2018 года в Днепре (ДИИТе), организаторы справедливо предлагают участникам сделать упор на теорию, исследования и практику. В этой связи рационально было бы вспомнить знаменитые на весь мир школы ученых ДНУ и КБЮ – М. К. Янгеля и В. И. Моссаковского, ДИИТа (ДНУЖТ) – В. А. Лазаряна и Н. Г. Бондаря, ДИСИ (ПГАСА) – А. П. Прусакова и А. Б. Моргаевского. К упомянутым шести корифеям середины XIX века можно было бы добавить еще несколько фамилий ученых-коллег из этих школ, воспитавших, в свою очередь, еще одно-два поколения тех же школ или их ответвлений.

Данные школы с их продолжениями связаны напрямую с подвижным составом, транспортными средствами, зданиями и сооружениями, в т.ч. мостовыми переходами и конструкциями дорог, с основаниями, грунтами, тоннелями и подземным строительством, с инфраструктурой [1-14]. Подчеркнем, что в ключевых словах теории и практики расчетов и конструирования всех упомянутых объектов всегда присутствует слово *динамика*! Эта наука всегда была разделом строительной механики высшей трудности. Поэтому некоторые университеты начинали с него изложение методов расчета сооружений, переходя потом к статике – как к частному случаю.

Автору посчастливилось активно поучаствовать в начале 70-х годов в исторических экс-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

периментах школы академика В. А. Лазаряна. Скорости вагона СВЛ с реактивной тягой достигали рекордно *невероятных тогда для железных дорог Союза цифр 250 км/ч*. С трибуны Всесоюзного совещания по скоростному наземному транспорту московский профессор Г. П. Бурчак (МИИТ) сказал: «... мы все в *Днепропетровск ездим как «в Мекку Динамики»!*

**Цель**

Одной из *целей* данной статьи является перечень успешных эпизодов истории развития динамики в Днепре и поиск путей повышения ее дальнейшей эффективности. Как сегодня модно говорить поиск *синергетических* возможностей объединения мастерства (достижений мастеров) в различных отраслях науки и техники. Мы не должны забывать в *Днепре* богатейшую научно-практическую историю ученых и инженеров *динамического Днепропетровска!* Город был знаменит всемирно известными Учеными и Инженерами, успехами в Космосе, скоростном транспорте, мостах и т.д. – а это сложнейшая ДИНАМИКА конструкций!

И взятые в кавычки слова в названии статьи имеют двойной смысл: если людей, работающих «на разных улицах и технических языках» объединить и взаимно обогатить методиками и знаниями, а отраслевые амбиции заменить единством и гордостью за город, то тогда и произойдет *резонанс* городского масштаба; а практически подобный опыт успешно проводится автором и молодежью межвузовского добровольного кружка «Резонанс» на протяжении уже 40 лет!

**Методика**

*Сложность* динамических явлений и современных научно-технических задач *возросла* в XXI веке, *во-первых*, из-за бурного развития научно-технического *прогресса* в строительстве (высоты и пролеты проектов новых зданий и сооружений стали измеряться в километрах) и на транспорте (здесь почти во всех видах наземного транспорта стали обсуждаться цифры 300...500 км/ч, ранее присущие только воздушным лайнерам).

*Во-вторых*, появились специфические *динамические нагрузки и ситуации* при эксплуатации новых технических объектов, связанные

с ростом *неустойчивости* развития *общества*: вандализм, террористические акты, безграмотное проектирование и эксплуатация конструкций и т.п. Печальные примеры здесь известны.

Новый век (и тысячелетие!) на Земле начался с землетрясений и цунами Юго-Восточной *Азии* (погибло более 200 тыс. чел.).

Затем – атака и разрушение *небоскребов-близнецов* ВТЦ в Нью-Йорке 11.09.2001.

14 февраля 2004 г. – обрушение массивной, с пролетом порядка 70 м, железобетонной оболочки покрытия одноэтажного *аквапарка* Трансвааль в московском Ясенево. Авария произошла вскоре после сдачи в эксплуатацию этого, почти геометрически изменяемого сооружения (если судить по двум самым низкочастотным формам собственных колебаний, заложенных «по проекту»).

И совсем недавно, 14 августа 2018 г., упал с людьми и машинами высокий (над трассами и многоэтажными домами) *автодорожный мост в Генуе*.

*В-третьих*, если скрупулезно изучать историю и развивать идеи самых сложных динамических явлений и задач с позиции фундаментальных основ, то сегодня, используя новейшую вычислительную и измерительную технику с возможностью создания новых типов приборов и аппаратуры, можно получить большую *пользу в новых* самых различных областях человеческой деятельности.

**Результаты**

Сделаем сначала некоторые *организационные* предложения по *синергетическому* объединению «спецов-динамиков», а затем, ниже, опишем 8 практических задач нового типа моделей на примерах объектов «общеконструкторского плана со строительным уклоном».

Для получения такого эффекта в сложных задачах динамики многих отраслей города требуется «всего лишь» создание необходимой материально-технической базы в виде оснащенных Лабораторий Динамики Конструкций (*ЛДК* – объединенной или по отделениям, заводам, вузам, стройкам: космос, транспорт, строительство и т.п.). В сборнике трудов 3-й конференции по мостам и туннелям 2012 г., вып.3, на с. 80-88 автор описал подробно в статье

трактате возможные варианты ЛДК, привел список 14 источников.

*Площадка ЛДК* может быть нейтральной, или приближенной либо к ЮМЗ (с многочисленными силовозбудителями и измерительно-испытательными комплексами КБЮ), либо к городку ДНУ. Именно в ДНУ есть единственная в регионе аэродинамическая труба, весьма малая и учебная. Известно, что модели всякого нового наземного солидного сооружения (моста или здания) должны «продуваться» во многих вариантах направлений и скоростей ветровых потоков, при разных ситуациях монтажа и рельефа окружения, заказчики всех крупных объектов мира, как правило, заключали договора с канадской Лабораторией Алана Давенпорта.

Возможно, конечно, и создание ЛДК на территориях и площадях двух инженерно-конструкторских вузов города ДИИТ, ПГАСА, которые пока не имеют мощных испытательных полигонов и специальных лабораторий по изучению динамического взаимодействия сооружений с потоками транспорта, воздуха, пешеходов и т.п.

Не исключается и вариант сотрудничества ЛДК с «Агентством по развитию Днепра» (площадка на левом берегу уже есть и ждет инвесторов). А также с проектировщиками, строителями, испытателями и эксплуатационниками самых крупных перспективных «динамических объектов города»:

*Метро под всем проспектом Дм. Яворницкого* (участвует фирма «Limak», Турция), где проблемы вибровзаимодействия поезда, пути, тоннеля, скальных и просадочных грунтов, а также жалоб жильцов старых и новых зданий над трассой и измерений шума и вибрации санитарно-эпидемиологическими службами – еще впереди, они возникают при пробных поездках, на некоторых режимах и участках грунтовых толщ, а меняются со сменой времен года, степенью износа ходовых частей и свойств пути при длительной эксплуатации тоннелей;

«надземного метро» – *канатной* пассажирской дороги через реку Днепр (наследство инженера-энтузиаста Ю. Ершова);

тестового участка *HyperLoop* – *сверхскоростной* дороги Илона Маска (чья фирма уже набирает опыт создания таких дорог в США и Израиле) и др.

Очевидно, что всем этим объектам при создании проектов и их внедрении понадобятся высококвалифицированные специалисты и инженеры, обученные и сертифицированные заранее по спецпрограммам в ЛДК.

А еще раньше, чем ЛДК, возможно, следует создать: а) Объединенный Днепропетровский Совет (*Центр*) по динамике; б) Школу, этаким «*Динамический Инкубатор*», работающий как с единым *образовательным* общим планом комплексных (теоретических и экспериментальных) лекций и практических работ-исследований, так и с более узко *специализированными* планами по отраслям, которые делегировали слушателей; в) Научный городской *семинар по динамике* конструкций и объектов.

Для всего этого требуется, конечно, уважительное тщательно-хозяйское сохранение опытных кадров специалистов, которые обеспечат передачу пластов знаний и подготовку достойных Днепра грамотных молодых кадров ученых и инженеров с коммерчески выгодными техническими приложениями и технологиями. Такая постановка исследований должна начинаться с глубокого патентного поиска и анализа научных отчетов фирм упомянутых выше корифеев науки и производства не менее, чем за 50 лет!

Ведь, например, в ДО ИМ АН УССР уже в те годы обсуждались конструкции и расчеты поездов на воздушной (капсула в трубе, трубо-транспорт), магнитной и электро-динамической подушках-подвесках; линейные электродвигатели. Автор, например, создавал расчетные и физические цепочечные механические модели летательных аппаратов (ЛА) для изучения (и снижения) влияния испытательной оснастки и параметров электродинамических вибростендов на динамические характеристики изделия. К работе этого стенда однажды Всеволод Арutyонович подвел М. В. Келдыша, Президента АН Союза, и попросил продемонстрировать особые режимы и эффекты двух методов: известного МКЖ и «нашего» нового МКМ.

И вот теперь, через 50 лет, от нашего города могут потребоваться «прочные» (любимое слово С. П. Тимошенко и В. А. Лазаряна) и полезные сведения и предложения на самом высоком уровне скоростей и техники. От *космических* планов И. Маска и Д. Безоса до чуть ниже и приземленнее идей Ю. Ершова по *канатным*

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

дорогам, а также и еще ниже – до заглубленно-го на 70 м метрополитена!

Предлагается от каждого из намеченных направлений-отраслей рассматриваемого города (любимого Днепра!) на ближайших *общи́х встреча́х* ученых и инженеров (активистов-динамистов!?) делегировать представителей, которые выступят с презентацией и раздадут материалы о *новациях* их предприятий, начиная с середины прошлого века и кончая планами на следующие годы. Показывать надо даты, цели, методики, авторов и исполнителей, успехи и трудности, апробации. А также – самое главное: к каким задачам можно сейчас эти новации *применить* и что надо для их *развития* (защита интеллектуальной собственности, какие требуются еще специалисты и сроки, какие стенды для проверок на макетах, где возможно внедрение, поиск организаций-коллабораторов и т.д.).

### Научная новизна

*После этих полуфантастических оргпредложений вернемся к доступной научной конкретике.* Например, в докладе показаны с иллюстрациями в виде моделей и временных виброграмм некоторые *практические возможности расширения* достигнутых ранее успехов на примерах объектов «обще-конструкторского плана», *задач динамики* от общей механики – до реальных задач *со строительным уклоном*. Ниже эти 8 задач обозначены лишь тезисно:

- о необходимости изучения и анализа традиционных (нормативных), аварийных и новых специфических динамических *нагрузок и воздействий*. *Природные* (аэродинамические, сейсмические, цунами, провалы и др.) и *антропогенные* (при работе машин, бытовые взрывы, обрушения от износа или неграмотной эксплуатации, террористические акты и т.п.) [3, 4].

- *прямой* динамический метод и необходимость теоретического решения многих задач динамики *во временной области*.

- об учете в динамических расчетах *нелинейных* свойств подсистем конструкций, материалов и сред. В каждой из известных четырех *групп* (*физические, геометрические, конструкционные, генетические*) могут насчитываться *десятки видов* нелинейностей. Нелинейными являются многие *упругие, диссипативные, инерционные* и другие свойства [2, 13].

- о выборе *уточненных научных* и *упрощенных инженерных* расчетных схем для статике и *динамических моделей* для динамики плоских и пространственных конструкций без излишней их детализации. Применение методов динамического: формообразования (МДФ – для предпроектным работам архитекторов), конструирования (МДК – для гашения колебаний и создания новых узлов типа semi-rigid), диагностики (МДД) [12].

- об исследованиях статико-динамического *взаимодействия* несущих конструкций с *подвижными* нагрузками и *потоками* различных *сред*, с нелинейными неоднородными грунтовыми основаниями и включениями [11, 12].

- о полезности и достоверности *одновременного компьютерного и физического моделирования* и исследования сложных задач, свойств и конструкций. О возможностях создания тренажеров для обучения персонала, в т.ч. при операциях ЧС.

- об особенностях и пользе *натурных, ходовых, стендовых, лабораторных* и других целенаправленных *испытаний моделей* (в т.ч. масштабных), *макетов* и *конструкций*.

- о комплексе исследований существующих и проектируемых конструкций и сооружений на основе *интегральной динамической диагностики*: паспортизация (проектный, первичный и текущие *динамические паспорта*, а также *сейсmodинамические* [10, 13], *виброэкологические* [14], *вибротехнологические* и др.), *мониторинг* состояния конструкций с автоматизацией начала *оперативных* мероприятий, диагностика и *поиск повреждений* по изменению динамических характеристик [7, 9] и усиление слабых мест объекта (создание совместно с коллабораторами программных комплексов, программируемых приборов поиска повреждений, приборов принятия оперативных решений по недопуску опасных для конкретного моста машин, колонн, скоростей и интервалов их движения и т.п.) [12].

### Практическая значимость

*Целесообразно внести изменения и в учебные процессы инженерных вузов.* Кроме этих направлений, развиваемых нами в ПГАСА (пока, к сожалению, только в общественном круж-

ке «Резонанс»), считаем необходимой и некоторую корректировку учебного процесса. С младших курсов, еще до магистратуры, у студентов всех строительных специальностей и специализаций должна быть возможность (например, по выбору) посещать современные профессионально развивающие спецкурсы. С добавлением (по согласованию с преподавателями) и практических, и курсовых, и исследовательских занятий, работ и проектов. Например, сегодняшним строителям (инженеры и архитекторы ПГС, механики, технологи и т.п.) важны и были бы полезны не только практическое участие в хоздоговорах, в поездках и обменах студентами, но и спецкурсы на следующие темы:

- «Введение в специальность»;
- «Теория и практика решения изобретательских задач в строительстве и динамике конструкций»;
- «Теория развития творческой личности»;
- «Уроки аварий сооружений»;
- «Компьютерное моделирование и работа сооружений»;
- «Обследование и испытание сооружений и их конструктивных элементов»;
- «Научные проблемы и исследование способов снижения статических и динамических напряжений»;
- «Динамика сооружений: аэродинамика и сейсмостойкость, прочность и выносливость, диагностика и поиск повреждений».

### Выводы

Вместо выводов смотрим упомянутую в п.3 статью и 14 источников литературы, кликаем Фейсбук, скачиваем файлы и смотрим видеолекции о статике и динамике, включаемся в работу группы и кружка. В качестве выводов по работе и списка литературы для сокращения объема статьи можно указать на цикл из примерно десятка лекций автора в YouTube, который удобно скачать в Фейсбуке со страницы группы «Динамика сооружений и кружок «Резонанс»:

<https://www.facebook.com/groups/215335672613881/files/> и затем см. файл: 908-Цикл Видеолекций, докладов проф. Кулябко В. В. в YouTube и другие файлы, активно участвуйте

в работе группы по динамике, приглашаем заинтересованных лиц – и на страничку группы, и в кружок!

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Некоторые задачи механики скоростного наземного транспорта. Теоретическое прогнозирование напряжений в конструкциях проектируемых экипажей [Текст] / В. А. Лазарян, В. Ф. Ушкалов, В. В. Кулябко, А. К. Шерстюк. – Киев : Наукова думка, 1974, С. 101-110.
2. Бондарь, Н. Г. Нелинейные автономные задачи механики упругих систем [Текст] / Н. Г. Бондарь. – Киев : «Будівельник», 1971. – 140 с.
3. Лантух-Лященко, А. І. До визначення граничного зносу прогонових будов автодорожніх мостів [Текст] / А. І. Лантух-Лященко, К. В. Медведєв // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 3. – С. 101-105.
4. Казакевич, М. И. Ветровая безопасность конструкций : монография [Текст]. Москва : Август Борг. 2015. – 288с.
5. Петренко, В. Д. Порівняльний аналіз напруженого стану конструкцій станцій односклепінчастого типу мілкого закладення [Текст] / В. Д. Петренко, О. Л.Тютюкін, М. В. Харатян, В. І. Петренко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 3. – С. 127-131.
6. Загора, А. Л. Гашение колебаний мостовых конструкций [Текст] / А. Л. Загора, М. И. Казакевич ; под ред. Н. Г. Бондаря. Москва : Транспорт, 1983. – 134 с.
7. Редченко, В. П. Особливості застосування спектрального аналізу при дослідженні коливаний будівельних конструкцій [Текст] / В. П. Редченко. – Дніпропетровськ : «Пороги», 2010. – 95с.
8. Тимофеева, Л. М. Современные методы усиления слабых оснований автомобильных дорог [Текст] / Л. М. Тимофеева, Е. С Краснов // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 3. – С. 217-220.
9. Брынза, А. А. К вопросу о выявлении трещин в транспортных конструкциях [Текст] / А. А. Брынза // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 3. – С. 22-25.
10. Кулябко, В. В. О системных IT- и BIM-уточнениях динамических моделей, расчетов и испытаний при защите и диагностике зданий и сооружений [Текст] / В. В. Кулябко // Міжвідомчий зб. будів. конструкції / Будівництво в сейсмічних районах України. – Київ, НДІБК, ОГАСА. – 2018. – 3 с.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

11. Кулябко, В. В. Моделирование колебаний длинноразмерной платформы при детерминированных и случайных возмущениях [Текст] / В. В. Кулябко // Нагруженность, колебания и прочность сложных механических систем. Киев : Наукова думка, 1977. – С. 120-127.
12. Кулябко, В. В. О расчете мостов и дорог на любые подвижные нагрузки с учетом инерционности, поддресоривания, торможения, разрыва связей, переменных скоростей и интервалов движения [Текст] / В. В. Кулябко, А. В. Макаров // Дороги і мости. – Київ : ДерждорНДі, – вип. 9. 2008. – С. 129-140.
13. Кулябко, В. В. О циклах алгоритмов разработки сейсмозащиты сооружений: нелинейные расчеты, конструирование, лабораторные и натурные испытания, паспортизация [Текст] / В. В. Кулябко // Міжвідомчий зб. будів. конструкції / Бу-В. В. КУЛЯБКО\*
14. Volodymyr Kulyabko, Maryna Babenko. Synergy of vibroecologists, programmers, inventors and testers of buildings and structures under the evaluation of the impact of the dynamics of structures // Раздел 2.8 в англоязычной монографии S 94 Sustainable housing and human settlement: Monograph / Editors: Nikolaienko S. Kulikov P. Pshinko O. Savvitskyi M. Radkevych A. Unchik S. Dukat S. Yurchenko Y. Babenko M. / Under the general editorship Savvitskyi M. – Dnipro – Bratislava: SHEE “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture” – Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, (263p., ISBN 978-966-323-182-2), с. 108-115.

\* Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва і архітектури, вул. Чернишевського, 24а. м. Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 745-23-72

## ЯК «ВВЕСТИ В РЕЗОНАНС» ВСЕСВІТНЬО ВІДОМІ НАУКОВІ ШКОЛИ ДНІПРА ДЛЯ ПІДЙОМУ ІНЖЕНЕРНОГО ПРЕСТИЖУ МІСТА

**Мета.** У статті запропоновано обговорити можливості застосування сьогодні досягнень і стиля робіт вчених Дніпра з метою деякого зближення вчених, що працюють над складними задачами з динаміки різних конструкцій та об'єктів, а також з розвитку молодих вчених. **Методику** такого аналізу спрямовано на пошук і організацію творчих спеціалістів, що зможуть передати молоді успіхи історичних наукових шкіл міських корифеїв динаміки ХХ сторіччя зі створення фундаментальних основи динаміки конструкцій різноманітних об'єктів та галузей. Зокрема, показано переваги (у порівнянні з МСЕ) і ефективність методу прямих при розв'язанні нелінійних задач динаміки в часовій області. Для вивчення і розповсюдження результатів, що можна використовувати у суміжних галузях зі статичних і динамічних розрахунків і випробувань, описано успіхи школи В. А. Лазаряна зі швидкісного наземного транспорту і М. Г. Бондаря з динаміки мостів, шкіл М. К. Янгеля, В. І. Моссаковського та ін. До беззаперечної **наукової новизни** можна віднести наведені у роботі 8 конкретних напрямків поліпшення розрахунків і практичних прийомів з моделювання динаміки нелінійних механічних систем, враховано різноманітні взаємодії їх підсистем, середовищ і зв'язків. Найближчим часом можлива участь міста у будівництві і експлуатації об'єктів типу HyperLoop, канатної пасажирської дороги, нових ділянок і станцій метро. У зв'язку з цим в роботі обґрунтовано необхідність розвитку лабораторій динаміки конструкцій (ЛДК), створення (з колабораторами) і застосування ефективного програмного забезпечення, уточнення розрахункових методів і моделей об'єктів, а також підвищення ролі експериментальної механіки і діагностики стану конструкцій. Надано організаційні пропозиції з розширення мережі ЛДК і новим шляхам динамічних способів формування конструкцій споруд, зниження коливань, паспортизації, моніторингу та пошуку пошкоджень, що мають **практичне значення**.

**Ключові слова:** динаміка споруд; динамічні розрахунки і випробування конструкцій, споруд, будівель, мостів; освіта.

V. V. KULJAVKO\*

\* Department «Metal, wooden and plastic structures» of Pridneprovsk state academy of civil engineering and architecture, Chernyshevsky st., 24a, Dnepr, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 745-23-72

## HOW TO «INDUCE THE RESONANCE» OF WORLD RENOWN SCIENTIFIC SCHOOLS OF DNIRO TO UPLIFT ENGINEERING PRESTIGE OF THE CITY

**Purpose.** The paper proposes to discuss the possibility of using today the achievements and work style of Dnipro scientists with the aim of some consolidating of the scientists engaged with difficult problems of different structures and objects dynamics and with the development of young scientists. **Methodology** of sun an analysis is directed on the search and organizing of creative specialists that would be able to pass on to the young the successes of historical science schools of city luminaries of XX century dynamics in creating the fundamental basis of structural dynamics for different objects and industries. In particular, demonstrated were the advantages (comparing with FEM) and effectiveness of the direct method when solving nonlinear problems of dynamics in transient field. To research and spreading the results, that may be used in adjacent fields of static and dynamic computations and tests, the advancements of V. A. Lazaryan's school of high-speed land transport and M. H. Bondar's bridge dynamics one, schools of M. K. Yangel, V. I. Mossakovsky and others' were described. The unconditional **originality** includes given in the work 8 particular directions of improvements for computations and practical methods of nonlinear mechanical systems dynamics modeling, various interactions of their subsystems, mediums and connections artaken into account. In the near future there is a possibility of city participation in the construction and operation of Hyper-Loop-type objects, passenger cableway, new metro sites and stations. Considering this the necessity of developing the laboratories of structural dynamics (SDL), creating (with collaborators) and application of effective software, elaboration of computation methods and models of objects and also increasing the role of experimental mechanics and structure condition diagnostics are justified in the work. Organizational suggestions of **practical value** are given for the expanding the SDL and new ways of dynamic means of shaping of structures, lowering vibrations, certification, monitoring and damages search.

**Keywords:** structural dynamics; dynamic computations and structures, bridges and buildings tests, education

### REFERENCES

1. Lazarjan V. A., Ushkalov V. F., Kuljabko V. V., Sherstjuk A. K. Nekotorye zadachi mehaniki skorostnogo nazemnogo transporta. Teoreticheskoe prognozirovanie na-prjazhenij v konstrukcijah proektiruemyh jekipazhej [Some problems of mechanics of high-speed ground transport. Theoretical prediction of stresses in the structures of the designed crews]. Kyjiv, Naukova dumka Publ., 1974, pp. 101-110.
2. Bondar' N. G. Nelinejnye avtonomnye zadachi mehaniki uprugih sistem [Nonlinear autonomous problems of mechanics of elastic systems]. Kyjiv, Budivel'nik Publ., 1971. – 140 p.
3. Lantux-Lyashhenko A. I., Medvedev K. V. Do vy`znachennya grany`chnogo znosu prigonovy`x budov avtodorozhnik mostiv [About the marginal wear of runways of road bridges]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 201, issue 3, pp. 101-105.
4. Kazakevich M. I. Vetrovaja bezopasnost' konstrukcij [Wind safety of structures]. Monografija. Moskow, Avgust Borg Publ., 2015. 288 p.
5. Petrenko V. D., Tyut'kin O. L., Xaratyan M. V., Petrenko V. I. Porivnyal`ny`j analiz napruzhenogo stanu konstrukcij stancij odno sklepinchastogo ty`pu milkogo zakladennja [Comparative analysis of the stressed state of constructions of stations of one vaulted type of shallow foundation]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 3, pp. 127-131.
6. Zakora A. L., Kazakevich M. I.; by red. Bondar N. G. Gashenie kolebanij mostovyh konstrukcij [Vibration damping of bridge structures]. Moskow, Transport Publ., 1983. 134 p.
7. Redchenko V. P. Osobly`vosti zastosuvannya spektral`nogo analizu pry` doslidzhenni koly`van` budivel`ny`x konstrukcij [Features of the application of spectral analysis in the study of fluctuations of building structures]. Dnipropetrovs`k, Porogy` Publ., 2010. 95 p.
8. Timofeeva L. M., Krasnov E. S. Sovremennye metody usilenija slabyh osnovanij avtomobil'nyh dorog [Modern methods of strengthening the weak bases of highways]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 3, pp. 217-220.
9. Brynza A. A. K voprosu o vyjavlenii treshhin v transportnyh konstrukcijah [On the issue of identifying cracks in transport structures]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 3, pp. 22-25.
10. Kuljabko V. V. O sistemnyh IT- i BIM-utochnenijah dinamicheskikh modelej, raschetov i ispytanij pri zashhite i diag-nostike zdaniy i sooruzhenij [About system IT- and BIM-refinements of dynamic models, calculations and

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- tests in the protection and diagnostics of buildings and structures]. Mizhvidomchij zb. budiv. konstrukcii [Interdepartmental building designs]/ Budivny`cztvo v sejsmichny`x rajonax Ukrayiny` [Construction in seismic areas of Ukraine]. Kyjiv, NDIBK, OGASA. – 2018. – 3 p.
11. Kuljabko V. V. Modelirovanie kolebanij dlinnobaznoj platformy pri determinirovannyh i sluchajnyh vozmushhe-nijah [Modeling of oscillations of a long-base platform with deterministic and random disturbances]. Nagruzhenost', kolebanija i prochnost' slozhnyh mehanicheskikh sistem [Load, oscillation and strength of complex mechanical systems]. Kyjiv, Naukova dumka Publ., 1977. pp. 120-127.
  12. Kuljabko V. V., Makarov A. V. O raschete mostov i dorog na ljubye podvizhnye nagruzki s uchedom inercionnosti, podressorivaniya, tormozheniya, razryva svyazej, peremennyh skorostej i intervalov dvizheniya [On the calculation of bridges and roads for any moving loads, taking into account the inertia, cushioning, braking, breaking of connections, variable speeds and intervals of movement]. Doroghy i mosty [Roads and bridges], issue. 9. Kyjiv, DerzhdorNDi Publ., 2008, pp. 129-140.
  13. Kuljabko V. V.. O ciklah algoritmov razrabotki sejsmozashhity sooruzhenij: nelinejnye raschety, konstruirovaniye, laboratornye i naturnye ispytaniya, pasportizacija [On the cycles of seismic protection algorithms for structures: non-linear calculations, design, laboratory and field tests, certification]. Mizhvidomchij zb. budiv. konstrukcii [Interdepartmental building designs]. Budivnyctvo v sejsmichnykh rajonakh Ukrayiny [Construction in seismic areas of Ukraine]. Kyjiv, NDIBK Publ., 2010, issue. 73, pp. 783-790.
  14. Kulyabko Volodymyr, Babenko Maryna Synergy of vibroecologists, programmers, inventors and testers of buildings and structures under the evaluation of the impact of the dynamics of structures. Chapter 2.8 in monography S 94 Sustainable housing and human settlement. Monograph. Editors: Nikolaienko S., Kulikov P., Pshinko O., Savytskyi M., Radkevych, A. Unchik S., Dukat S., Yurchenko Y., Babenko M. Under the general editorship Savytskyi M. Dnipro – Bratislava, SHEE “Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture” – Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, (263 p., ISBN 978-966-323-182-2), pp.108-115.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н, доц. С. М. Ганєєв, д.т.н., проф. А. В. Радкевич*

Надійшла до редколегії 18.09.2018.

Прийнята до друку 22.10.2018.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 622.272/.28

І. В. МЯСНИКОВ<sup>1\*</sup>, С. М. ГАПЄЄВ<sup>2</sup>, М. О. ВИГОДІН<sup>3</sup>, О. З. ПРОКУДІН<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 706 91 66, ел. пошта miasnykov.i.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-7525-6196

<sup>2</sup> Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 362 04 47, ел. пошта harieiev.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-0203-7424

<sup>3</sup> Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 361 07 19, ел. пошта referent@mlad.com.ua, ORCID 0000-0001-9069-543X

<sup>4</sup> Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (066) 438 13 95, ел. пошта sanya-prokudin@rambler.ru, ORCID 0000-0003-4132-8662

### НОВІ ТИПИ МІЖРАМНОГО ОГОРОДЖЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ КРІПЛЕННЯ КАПІТАЛЬНИХ ВИРОБОК

**Мета.** Метою досліджень є знаходження методів зниження витрат на ремонт і підтримку капітальних виробок шахт задля зменшення собівартості добутого вугілля. **Методика.** Для одержання поставленої мети, у ході виконання досліджень були досліджені капітальні гірничі виробки, частина з яких не відповідає вимогам правил безпеки (ПБ), та причини виходу кріплення таких виробок з ладу на прикладі шахт Західного Донбасу, що входять до структури ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». **Результати.** На базі отриманих експериментальних даних були розроблені способи підвищення несучої здатності капітальних гірничих виробок, такі як застосування нових типів міжрамного огородження з підвищеної несучою здатністю та способи його застосування у комбінованому кріпленні з тампонажем закріпного простору. Оцінений їх вплив на загальну несучу здатність гірничого кріплення та економічний ефект від їх застосування. **Наукова новизна.** Запроваджені новітні методи по підсиленню та удосконаленню сучасних типів комбінованого кріплення капітальних гірничих виробок. Запропоновані технологічні параметри такого кріплення та технологічні аспекти його застосування. **Практична значимість.** Запропоновані конструкції міжрамного огородження підвищеної стосовно залізобетонного огородження несучої здатності дозволяють підвищити міжремонтний період експлуатації гірничого кріплення капітальних виробок, а, отже, знизити експлуатаційні витрати. Застосування запропонованих конструкцій підвищує безпеку праці гірників. Конструкції, розглянуті в статті, є економічно доцільними та дозволяють отримати під час застосування економічний ефект за рахунок зменшення капітальних затрат на ремонт та підтримку капітальних виробок, закріплених таким видом комбінованого кріплення.

*Ключові слова:* міжрамна огорожа; гірниче кріплення; несуча здатність; капітальні виробки; комбіноване кріплення

#### Вступ

Економічна безпека визначається станом національної економіки, при досягненні якого забезпечуються національні інтереси. Одним з найважливіших питань при досягненні такої незалежності є забезпечення потреб населення в енергоресурсах. Не зважаючи на світову глобалізацію та зростання впливу альтернативних джерел енергії, основним енергоносієм залишається вугілля – сировина, запаси якої достатні для задоволення потреб національної економіки. Тому першочерговим завданням для підприємств вуглевидобутку є збільшення величини видобутку та зменшення собівартості вугілля [1].

Реалізація планів підвищення видобутку вугілля базується на використанні запасів діючих шахт, в тому числі за рахунок збільшення площ шахтних полів, підготовки нових, більш глибоких горизонтів, залучення до відпрацювання законсервованих запасів, або тих, які раніше вважалися економічно невивідними.

Першою стратегічною задачею в цьому напрямі є будівництво комплексу капітальних і основних магістральних протяжних виробок шахт. Але в надто складних гірничо-геологічних умовах відробки вугільних пластів, що характеризуються наявністю слабких вміщуючих глинистих і піщано-глинистих порід з низьким ступенем метаморфізму, різкою втра-

тою міцності цих порід за наявності вологи, інтенсивним здиманням порід підосви, наявністю геологічних порушень, при будівництві і експлуатації протяжних виробок виникають значні проблеми.

Для проведення робіт при впливі таких чинників характерне постійне зростання витрат, що зрештою призводить до збільшення собівартості вугілля, оскільки до її структури входять і витрати на спорудження, ремонт і підтримку підготовчих виробок.

Іншим важливим чинником є забезпечення безпеки гірничовидобувних робіт, яка передбачає відповідність параметрів виробок нормам експлуатації та уникнення тяжких або аварійних ситуацій, що призводить до порушення ритмічності технологічних процесів, матеріальним та людським втратам.

Таким чином, комплексний аналіз стану протяжних виробок шахт Західного Донбасу, ступіню впливу негативних чинників, що призводять до проблемних ситуацій, для вибору ефективних напрямів забезпечення тривалої стійкості виробок є актуальною науково-технічною задачею.

### Мета

Метою досліджень є знаходження методів зниження витрат на ремонт і підтримку капітальних виробок шахт задля зменшення собівартості добутого вугілля.

### Методика

Аналізуючи дані про довжину гірничих виробок, загальний їх стан, частку виробок, які не відповідають з тих чи інших причин вимогам правил безпеки, обсяги і форми ремонтних робіт по виробках шахт ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», можна побачити, що переважною причиною відхилень від ПБ (рис. 1) є невідповідність за поперечним перерізом виробок, що складає в середньому по всіх шахтах акціонерного товариства – 21162 п.м., за висотою та за зазорами – 3031 п.м. та 14923 п.м. відповідно.

Основним способом збереження стійкості магістральних виробок є їх кріплення. Традиційні види кріплення (металеве арочне, монолітне бетонне, збірне залізобетонне та ін.) є досить дорогими і матеріаломісткими, вимагають великих витрат ручної праці на зведення, пога-

но піддаються механізації. Крім того, найбільш розповсюджене металеве аркове кріплення не забезпечує щільний контакт з породним масивом, що не дозволяє використовувати несучу здатність приконтурного шару породи, і часто виконує лише роль огорожувальної конструкції [2].

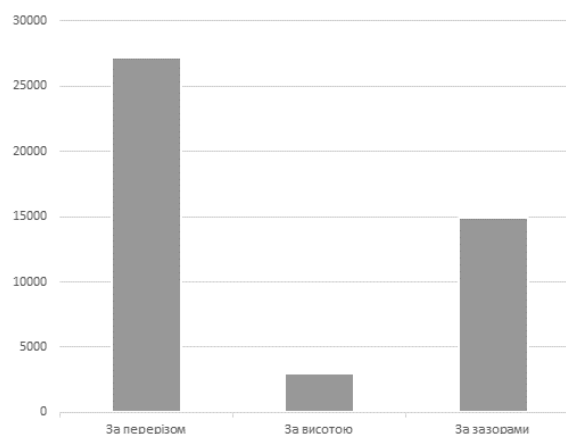


Рис. 1. Діючі виробки закріплені металом, що не відповідають вимогам ПБ

Часткове вирішення цього питання можливе в початковий період будівництва виробок, використовуючи можливості самого породного масиву, через збільшення його несучої здатності, яке реалізується створенням системи «основне кріплення – породний масив – додаткові заходи». Останнє може бути досягнуто застосуванням способів охорони, які спрямовані на включення приконтурного породного масиву в спільну роботу з огорожувальними конструкціями. Одним з видів кріплення, яке здатне реалізувати це, є анкерне кріплення [3].

Крім того, велику значимість має стан міжрамного огородження. Адже міжрамне огородження, що вийшло з ладу, несе безпосередню небезпеку при веденні гірничих робіт. Досвід експлуатації різного типу шахтних затяжок (міжрамного огородження) свідчить про те, що більшість з них мають недостатню несучу здатність [4], а збільшення несучої здатності кріплення (металевих конструкцій) дозволить лише сповільнити зрушення всередину виробки приконтурного масиву порід, однак цього недостатньо [5, 6].

Одними із засобів вирішення поставленої задачі є впровадження нових типів замкових з'єднань та нового типу міжрамного огородження з підвищеною несучою здатністю. В

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

рамках даної роботи буде розглянуто нові типи міжрамного огороження, що матимуть підвищену несучу здатність.

Огородження є складовою частиною конструкції кріплення та має вплив на величину його несучої здатності в цілому і, як наслідок – на підвищення несучої здатності та на збереження гірничих виробок. Застосування нового типу міжрамного огороження з підвищеною несучою здатністю дозволить зменшити кількість виробок, які підлягають ремонту, і тим самим зменшити долю витрат на ремонти, сума яких впливає на збільшення собівартості вугілля [7].

### Результати

Зниження витрат на підтримку гірничих виробок може бути досягнуто при дотриманні комплексу правил: створення форми виробки, найбільш доцільної для даних гірничо-геологічних умов; вибір раціональних способів охорони виробок; застосування кріплення відповідного типу і несучої здатності.

Найбільшого поширення для забезпечення експлуатаційної стійкості в капітальних гірничих виробках, а також підземних транспортних і гідротехнічних спорудах, отримали зведені різним способом різноманітні конструкції кріплення, виготовлені в основному з металу, монолітного і збірного залізобетону. Їх класифікації та області раціонального застосування наведені в спеціальній літературі [8, 9].

На даний час для вирішення питання підвищення несучої здатності кріплення в складних гірничо-геологічних умовах прийнято, що для забезпечення експлуатаційного стану виробок необхідно поряд із встановленням кріплення застосовувати спеціальні заходи з управління процесом руйнування навколишніх порід [10, 11], беручи до уваги наявну на шахтах Західного Донбасу схильність вміщуючих порід до розкисання при наявності води, після чого підтримка виробки в даних умовах стає значно складнішим завданням. Тому одним із шляхів забезпечення стійкості капітальних виробок в таких умовах є застосування систем кріплення на основі технології заповнення закріпного простору твердіючими сумішами, які в такому випадку будуть додатково виконувати функцію гідроізоляції. Досвід підтримки виробок на шахтах Західного Донбасу показав його високу

технологічність і ефективність. В результаті рівномірного розподілення навантаження, усунення зосереджених зусиль і перекосу більш раціонально використовується і матеріал самого кріплення, знижується величина згинаючих моментів, ефективніше працюють вузли податливості, з'являється додатковий несучий шар із затверділого матеріалу.

Проте, не дивлячись на хороші результати, слід зазначити суттєвий недолік даної технології. В якості несучої конструкції капітальних виробок найчастіше застосовують кріплення КШПУ, а в якості міжрамного огороження використовують плоску залізобетонну плиту, яка після проведення пікотажу виконує функції опалубки при виконанні тампонажних робіт.

Залізобетонне огороження як несучий елемент в цій конструкції кріплення є малоефективним, оскільки має низьку несучу здатність, ресурсомістким, в технологічному плані має цілу низку недоліків: воно багатоелементне, трудомістке в установці, формує велику кількість стиків після укладання.

Встановлена у виробці рама металевого кріплення із залізобетонним огороженням не перешкоджає розшаруванню і обваленням приконтурного масиву. Більш того, технологія встановлення залізобетонного огороження передбачає наявність деякого простору за кріпленням, що в подальшому провокує деформаційні процеси на контурі породного оголення поза кріпленням. Необхідне в цьому випадку ретельне заповнення дрібною породою закріпного простору як правило не виконується, оскільки являє собою трудомістку, немеханізовану операцію, а виконані дослідження [13] показали, що за відсутністю контакту кріплення з матеріалом породного заповнення у секторі  $40 \dots 60^\circ$  (найчастіший випадок) призводить до зниження несучої здатності кріплення у 2 ... 2,5 рази в порівнянні з розрахунковою. Це також призводить до формування несиметричного навантаження на раму кріплення, що в свою чергу провокує її роботу поза паспортним режимом експлуатації та швидкий вихід конструкції з ладу [14].

Попередити руйнування приконтурного масиву порід у привибійній частині виробки можна за рахунок застосування анкерів, що встановлюються в склепінчастій її частині безпосередньо у вибої. Комбіноване кріплення на основі

таких систем спроможне протистояти значним навантаженням, що виникають у виробці під час дії на неї інтенсивних технологічних впливів [15].

Стосовно до такої конструкції кріплення, заповнення закріпного простору матеріалами (порода, тампонажний розчин, штучні твердіючі суміші) може проводитися як за технологічним комплексом з проведення виробки, так і безпосередньо у вибої, що дозволить створити взаємодійну систему «кріплення-масив», попередити розшарування і обвалення приконтурних порід, зберігаючи їх несучу здатність, рівномірно розподілити зовнішнє навантаження по периметру кріплення. За рахунок цього кріплення буде працювати в оптимальному режимі, що забезпечить тривалу стійкість капітальних виробок при мінімальних витратах на їх ремонт і профілактику [16].

У зв'язку з цим, перспективним і ефективним рішенням у вдосконаленні конструкції металевого рамного кріплення є заміна традиційного залізобетонного огороження шаром набризкбетону, що укладається на металеве сітчасте огороження.

Металеве сітчасте огороження, яке застосовується для даної конструкції, також може бути вдосконалене. Застосування просторового металевого сітчастого огороження [17] (рис. 2) спільно з набризкбетонам дозволить в декілька разів збільшити несучу здатність міжрамного огороження. Економічна доцільність застосування такого огороження для кріплення капітальних виробок доведена в статті [18].

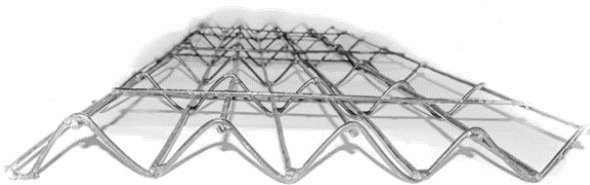


Рис. 2. Загальний вид просторового міжрамного огороження

Незважаючи на переваги застосування просторового огороження, воно не доцільне при проходженні підготовчих виробок. В цьому випадку просторове або залізобетонне огороження можуть бути замінені огороженням на основі профнастилу (рис. 3) – більш зручним за технологічністю і транспортабельністю та дешевшим за матеріалом.

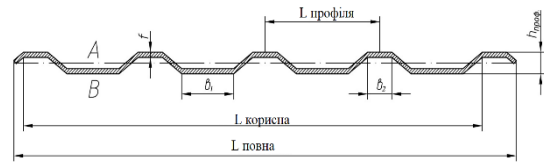


Рис. 3. Загальний вигляд міжрамного огороження з профнастилу

На рис. 3 використані наступні позначення:  
– висота профілю ( $h_{\text{проф}}$ ). Даний параметр вказує відстань між крайніми точками двох суміжних гофрів;

– корисна (робоча) ширина виробу ( $L_{\text{корисна}}$ ). Ширина листа з урахуванням технології стиковок двох профілів, тобто їх перекриття на довжину одного гофру (внахлест). Зазвичай даний параметр менший габаритного розміру одного виду на 40...80 мм;

– ширина "хвиль" профілю-листа ( $b_1, b_2$ ). Від цієї величини залежить жорсткість виробу;

– розташування полк листа. Виріб має дві сторони – "А" (вужка полка) і "В" (широка полка). При монтажі сторона "А" повинна приймати навантаження, а "В" – розташовується на монтажну опору. Таке правильне розташування профільного листа дозволить максимально використовувати його несучу здатність.

Після монтажу кріплення та монтажу профільного листа в якості міжрамного огороження передбачається виконання тампонажу закріпного простору. Ця операція здійснюється на відстані 15-30 м від вибою, відхилення породного контуру не повинні надавати тиску на профнастил. Тоді основне навантаження на міжрамне огороження буде надавати закачуваний тампонажний розчин.

### Наукова новизна

Запроваджені новітні методи з підсилення та удосконалення сучасних типів комбінованого кріплення капітальних гірничих виробок. Запропоновані технічні параметри такого кріплення та технологічні аспекти його застосування.

### Практична значимість

1. Запропоновані конструкції міжрамного огороження підвищеної стосовно залізобетонного огороження несучої здатності дозволяють підвищити міжремонтний період експлуатації

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

гірничого кріплення капітальних виробок, а отже, знизити експлуатаційні витрати.

2. Застосування запропонованих конструкцій підвищує безпеку праці гірників.

3. Конструкції, розглянуті в статті, є економічно доцільними та дозволяють отримати під час застосування економічний ефект за рахунок зменшення капітальних затрат на ремонт та підтримку капітальних виробок закріплених таким видом комбінованого кріплення.

**Висновки**

Під час орієнтації країни на економічну незалежність, питання підвищення видобутку вугілля та зменшення його собівартості набуває все більшої актуальності. Одним із шляхів вирішення цього питання є зменшення витрат на підтримання та ремонт гірничих виробок. Загальноприйняті методи полягають у підвищенні несучої здатності металевих конструкцій гірничого кріплення, але в складних гірничо-геологічних умовах, в умовах переходу на все більші глибини розробки, такий спосіб не може у повній мірі задовольнити вимоги виробництва. Адже таке кріплення суттєво дорожчає, його встановлення стає все більш праце- та матеріаломістким.

Вирішення полягає у застосованні систем комбінованого кріплення, із спеціальними заходами з управління процесом руйнування навколишніх порід нарівні з застосуванням нових типів міжрамного огородження з підвищеною несучою здатністю та новими типами замкових з'єднань.

Запропоновані в статті заходи дозволяють суттєво підвищувати несучу здатність кріплення капітальних виробок, термін їх роботи без проведення ремонтів, а тому дозволяють зменшити долю питомих витрат на тонну добутого вугілля.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

- Гапеев, С. Н. Анализ причин возникновения несимметричной нагрузки на рамную металлическую крепь и направления повышения ее несущей способности [Текст] / С. Н. Гапеев, Г. Г. Сторчак // Перспективы освоения подземного пространства : материалы конф. – Днепропетровск, 2011. – С. 94-99.
- Хоменчук, О. В. Возведение набрызобетонной крепи взрывом [Текст] / О. В. Хоменчук, С. В. Борщевский, В. В. Гончаренко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – С. 115-119.
- Tereshchuk R. M., Khoziaikina N. V. and Babets D. V. (2018), "Substantiation of rational roofbolting parameters", Scientific bulletin of National Mining University, № 1. pp. 19-26.
- Солдатов, К. И. Оптимизация поперечного сечения железобетонной шахтной затяжки [Текст] / К. И. Солдатов, Ю. Л. Заяц // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – С. 99-104.
- Инновационные технологии тампонажа закрепного пространства в сложных горно-геологических условиях шахт Западного Донбасса : монография [Текст] / С. А. Воронин, С. В. Мкртчян, А. В. Солодянкин, М. А. Выгодин, А. З. Прокудин. – Днепропетровск : Литограф, 2015. – 78 с.
- Солодянкин, А. В. Обоснование рациональных параметров технологии тампонажа закрепного пространства [Текст] / А. В. Солодянкин, К. В. Кравченко, А. З. Прокудин, А. М. Выгодин // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2016. – № 1(38). – С. 22-29.
- Солодянкин, А. В. Оценка интенсивности ремонтных работ и устойчивость протяженных горных выработок [Текст] / А. В. Солодянкин, С. В. Машурка // Вісник Криворізького національного університету. – 2016. – Вип. 41. – С. 97-102.
- Баклашов, И. В. Механика подземных сооружений и конструкции крепи [Текст] / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. – Москва : Недра, 1984. – 415 с.
- Каретников, В. Н. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок [Текст] : справочник / В. Н. Каретников, В. Б. Клейменов, А. Г. Нуждихин. – Москва : Недра, 1989. – 571 с.
- Солодянкин, А. В. О повышении устойчивости капитальных горных выработок шахт Западного Донбасса [Текст] / А. В. Солодянкин, В. В. Коробченко, М. А. Выгодин, А. З. Прокудин // Уголь Украины. – 2015. – № 12. – С. 23-30.
- Перспективы использования извлекаемой породы при обеспечении устойчивости капитальных выработок шахт компании «ДТЭК Павлоградуголь» [Текст] : монография / С. А. Воронин, С. В. Мкртчян, А. В. Солодянкин, М. А. Выгодин, В. С. Гаркуша. – Днепропетровск : Литограф, 2016. – 89 с.
- Евтушенко, В. В. Эффективность тампонажа закрепного пространства при креплении горных выработок металлическими арками [Текст] /

- В. В. Евтушенко // Шахтное строительство. – 1973. – № 5. – С. 29-30.
13. Максимов, А. П. Влияние качества забутовки на несущую способность металлической арочной крепи [Текст] / А. П. Максимов, А. Н. Шашенко, А. Н. Роечко // Шахтное строительство. – 1987. – № 3. – С. 9-12.
14. Сторчак, Г. Г. Пути обеспечения длительной устойчивости протяженных горных выработок в условиях несимметричных нагрузок при использовании рамной крепи [Текст] / Г. Г. Сторчак, А. В. Халимендик, В. В. Пустовой, Ал. В. Халимендик // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Кременчук : КрНУ, 2013. – Вип. 2(11). – С. 157-166.
15. Sdvyzhkova O. O., Babets D. V., Kravchenko K. V. and Smirnov A. V. (2016) “Determining the displacements of rock mass nearby the dismantling chamber under effect of plow longwall”, Scientific bulletin of National Mining University, № 2. pp. 34-42.
16. Solodyankin O. V., Hryhoriev O. Y., Dudka I. V. and Mashurka S. V. (2017) “Criterion to select rational parameters of supports to reduce expenditures connected with construction and maintenance of development working”, Scientific bulletin of National Mining University, № 2. pp 19-27.
17. Мясников, І. В. До питання застосування міжрамної огорожі підвищеної несучої здатності [Текст] / І. В. Мясников // Перспективи розвитку будівельних технологій: матеріали конф. - Дніпро, 2018. – С. 84-88.
18. Гапєєв, С. М. Обґрунтування економічної доцільності застосування міжрамної огорожі підвищеної несучої здатності [Текст] / С. М. Гапєєв, М. О. Вигодин, І. В. Мясников // Проблеми геоінженерії та підземної урбаністики: матеріали конф. – Київ, 2018. – С. 56-59.

И. В. МЯСНИКОВ<sup>1\*</sup>, С. Н. ГАПЕЕВ<sup>2</sup>, М. А. ВЫГОДИН<sup>3</sup>, А. З. ПРОКУДИН<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра строительства, геотехники и геомеханики, НТУ «Днепровская политехника», пр. Д. Яворницкого, 19, Днепр, Украина, 49005, тел. +38 (095) 706 91 66, эл. почта miasnykov.i.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-7525-6196

<sup>2</sup> Кафедра строительства, геотехники и геомеханики, НТУ «Днепровская политехника», пр. Д. Яворницкого, 19, Днепр, Украина, 49005, тел. +38 (050) 362 04 47, эл. почта hapieiev.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-0203-7424

<sup>3</sup> Кафедра строительства, геотехники и геомеханики, НТУ «Днепровская политехника», пр. Д. Яворницкого, 19, Днепр, Украина, 49005, тел. +38 (050) 361 07 19, эл. почта referent@mlad.com.ua, ORCID 0000-0001-9069-543X

<sup>4</sup> Кафедра строительства, геотехники и геомеханики, НТУ «Днепровская политехника», пр. Д. Яворницкого, 19, Днепр, Украина, 49005, тел. +38 (066) 438 13 95, эл. почта sanya-prokudin@rambler.ru, ORCID 0000-0003-4132-8662

## НОВЫЕ ТИПЫ МЕЖРАМНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КРЕПИ КАПИТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

**Цель.** Целью исследований является нахождение методов снижения затрат на ремонт и поддержание капитальных выработок шахт для уменьшения себестоимости добытого угля. **Методика.** Для достижения поставленной цели, в ходе выполнения исследований были проанализированы капитальные горные выработки, часть из которых не отвечает требованиям правил безопасности (ПБ), и причины выхода крепи таких выработок из строя на примере шахт Западного Донбасса, входящих в структуру ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь». **Результаты.** На базе полученных экспериментальных данных были разработаны способы повышения несущей способности капитальных горных выработок, такие как применение новых типов межрамного ограждения с повышенной несущей способностью и способы его применения в комбинированных крепях с тампонажем закрепного пространства. Оценено их влияние на общую несущую способность горной крепи и экономический эффект от их применения. **Научная новизна.** Введены новые методы по усилению и совершенствованию современных типов комбинированной крепи капитальных горных выработок. Предложенные технические параметры такой крепи и технологические аспекты ее применения. **Практическая ценность.** Предложенные конструкции межрамного ограждения повышенной относительно железобетонного ограждения несущей способности позволяют повысить межремонтный период эксплуатации горной крепи капитальных выработок, а, следовательно, снизить эксплуатационные расходы. Применение предложенных конструкций повышает безопасность труда горняков. Конструкции, рассмотренные в статье, являются экономически целесообразными и позволяют получить при применении экономический эффект за счет уменьшения капитальных затрат на ремонт и поддержание капитальных выработок, закрепленных таким видом комбинированной крепи.

*Ключевые слова:* межрамное ограждение; горная крепь; несущая способность; капитальные выработки; комбинированная крепь

I. MYASNIKOV<sup>1\*</sup>, S. HAPIEIEV<sup>2</sup>, M. VYGODIN<sup>3</sup>, O. PROKUDIN<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Department of construction, geotechnics and geomechanics, NTU «Dnepr Polytechnic», pr. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnepr, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 706 91 66, e-mail miasnykov.i.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-7525-6196

<sup>2</sup> Department of construction, geotechnics and geomechanics, NTU «Dnepr Polytechnic», pr. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnepr, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 362 04 47, e-mail hapieiev.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-0203-7424

<sup>3</sup> Department of construction, geotechnics and geomechanics, NTU «Dnepr Polytechnic», pr. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnepr, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 361 07 19, e-mail referent@mlad.com.ua, ORCID 0000-0001-9069-543X

<sup>4</sup> Department of construction, geotechnics and geomechanics, NTU «Dnepr Polytechnic», pr. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnepr, Ukraine, 49005, tel. +38 (066) 438 13 95, e-mail sanya-prokudin@rambler.ru, ORCID 0000-0003-4132-8662

## NEW TYPES OF INTERFRAME WALLS FOR LOAD-BEARING STRENGTH INCREASING OF MAIN MINE WORKINGS SUPPORT

**Purpose.** Finding methods to reduce the cost of repairs and maintenance of main mine workings, by that, to reduce the prime cost of mined coal. **Methodology.** In order to achieve this goal, in the course of the implementation of the research work, main mine workings were investigated, some of which do not meet the requirements of safety regulations, and reasons for the failures of such workings on the example of the Western Donbass mine of PJSC «DTEK Pavlogradvugillya». **Findings.** On the basis of the obtained experimental data, methods of increasing the load-bearing strength of main mine workings were developed. Such as the application of new types of interframe walls with increased load-bearing capacity and methods of its application in a combination with tamponage behind the frames space. Evaluated their influence on the overall bearing capacity of the mine frames and the economic effect of their application. **Originality.** New methods have been introduced to strengthen and improve modern types of combined mine support of main mine workings. Proposed were technological parameters of such fastening and technological aspects of its application. **Practical value.** The proposed structures of the interframe walls of a load-bearing strength, which is heightened with respect to the reinforced concrete interframe walls, makes it possible to reduce the overhaul period of operation of the mining support of the main mine workings, and, consequently, to reduce the operating cost. The use of the proposed designs increases the safety of miners. The constructions considered in the article are economically feasible and allow one to obtain economic benefit by applying a reduction in the capital expenditures for repair and support of main mine workings secured by this type of combined mine support.

*Keywords:* interframe walls; mine support; load-bearing strength; main mine workings; combined mine support

### REFERENCES

1. Hapieiev S. M., Storchak G.G. Analiz prichin vozniknoveniya nesimmetrichnoy nagruzki na ramnyuyu metallicheskiy krep i napravleniya povyisheniya ee nesuschey sposobnosti [Analysis of the reasons for the appearance of an asymmetric load on the frame metal support and the direction of increasing its bearing capacity]. *Materialyi konferentsii "Perspektivy osvoeniya podzemnogo prostranstva (2011)"* [Proc. of the conf. "Prospects for the development of underground space"]. Dnepropetrovsk, 2011, pp. 94-99.
2. Khomenchuk O. V., Borschevsky S. V., Goncharenko V. V. Vozvedenie nabryzbetonnoy krepri vzryivom [Erection of a spattered concrete support by explosion]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 1, pp. 115-119.
3. Tereshchuk R. M., Khoziaikina N. V. and Babets D. V. (2018), "Substantiation of rational roof-bolting parameters", Scientific bulletin of National Mining University, № 1, pp. 15-26.
4. Kim Soldatov, Yuri Zayac Optimizatsiya poperechnogo secheniya zhelezobetonnoy shahtnoy zatyazhki [Optimization cross section of reinforced concrete mine tightening]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2014, issue 5, pp. 99-104.
5. Voronin S. A., Mkrtchyan S. V., Solodyankin A. V., Vyigodin M. A., Prokudin A. Z. *Innovatsionnyie tehnologii tamponazha zakrepnogo prostranstva v slozhnyih gorno-geologicheskikh usloviyah shaht Zapadnogo Donbassa* [Innovative technologies of tamponage of fixed space in complex mining-geological conditions of the mines of the Western Donbass]. Monografiya. Dnepropetrovsk, Litograf Publ., 2015. 78 p.

6. Solodyankin A. V., Kravchenko K. V., Prokudin A. Z., Vygodin A. M. Obosnovanie racionalnyh parametrov tehnologii tamponazha zakrepnogo prostranstva [Substantiation of rational parameters skin grouting technology]. "Visti Doneckogo girnichogo institutu (2016)" [Proc. of the conf. "The Donetsk Mining Institute's news"]. Donetsk, 2016, issue 1, pp. 22-29.
7. Solodyankin A. V., Mashurka S. V. Ocenka intensivnosti remontnyh rabot i ustojchivost protyazhennyh gornyh vyrabotok [Estimation of intensity of repair works and stability of extended mining operations] "Visnik Krivorizkogo nacionalnogo universitet (2016)" [Proc. of the conf. "Bulletin of the Krivoy Rog National University"], Krivoy Rog, 2016, issue 41, pp. 97-102.
8. Baklashov I. V., Kartoziya B. A. Mehanika podzemnyh sooruzhenij i konstrukcii krepі [Mechanics of underground structures and support structures]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 415 p.
9. Karetnikov V. N., Klejmenov V. B., Nuzhdihin A. G. Kreplenie kapitalnyh i podgotovitelnyh gornyh vyrabotok [Mounting of capital and preparatory mine workings]. Spravochnik, Moscow, Nedra Publ., 1989. 571 p.
10. Solodyankin A. V., Korobchenko V. V., Vygodin M. A., Prokudin A. Z. O povyshenii ustojchivosti kapitalnyh gornyh vyrabotok shaht Zapadnogo Donbassa [About increase of stability of capital mine workings of mines of the Western Donbass] Ugol Ukrainy, 2015. vol. 12, pp. 23-30.
11. Voronin S. A., Mkrtychyan S. V., Solodyankin A. V., Vygodin M. A., Garkusha V. S. Perspektivy ispolzovaniya izvlekaemoj porody pri obespechenii ustojchivosti ka-pitalnyh vyrabotok shaht kompanii «DTEK Pavlogradugol» [Prospects for the use of recoverable rock while ensuring the sustainability of capital mine workings of DTEK Pavlogradugol]. Monografiya. Dnepr, Litograf Publ., 2016. 89 p.
12. Evtushenko V. V. Effektivnost tamponazha zakrepnogo prostranstva pri kreplenii gornyh vyrabotok metallicheskimi arkami [Effectiveness of plugging of the anchorage space when fixing mine workings with metal arches] Shahtnoe stroitelstvo, 1973, № 5, pp. 29-30.
13. Maksimov A. P., Shashenko A. N., Roenko A. N. Vliyanie kachestva zabutovki na nesushuyu sposobnost metallicheskoj arochnoj krepі [Effect of backfill quality on the bearing capacity of metal arch support] Shahtnoe stroitelstvo, 1987, № 3, pp. 9-12.
14. Storchak G. G., Halimendik A. V., Pustovoj V. V. Puti obespecheniya dlitelnoj ustojchivosti protyazhennyh gornyh vyra-botok v usloviyah nesimmetrichnyh nagruzok pri ispolzovanii ramnoj krepі [Ways to ensure long-term stability of extended mine workings in conditions of asymmetric loads when using frame support]. Suchasni resursoenergo-sberigayuchi tehnologii girnichogo virobniictva [Modern resource-saving-saving technologies of mining production]. Kremenchuk, KrNU Publ., 2013, № 2(11), pp. 157-166.
15. Sdvyzhkova O. O., Babets D. V., Kravchenko K. V., Smirnov A. V. "Determining the displacements of rock mass nearby the dismantling chamber under effect of plow longwall", Scientific bulletin of National Mining University, 2016, № 2. pp. 34-42
16. Solodyankin O. V., Hryhoriev O. Y., Dudka I. V., Mashurka S. V. "Criterion to select rational parameters of supports to reduce expenditures connected with construction and maintenance of development working", Scientific bulletin of National Mining University, 2017, № 2, pp 19-27.
17. Myasnikov V. Do pitannya zastosuvannya mizhramnoyi ogorozhi pidvishenoyi nesuchoyi zdatnosti [To the question of application of interframe fence of high carrying capacity] Materialy konferentsii "Perspektivi rozvitku budivelnih tehnologij [Proc. of the conf. "Prospects for the development of construction technologies"]. Dnepr, 2018, pp. 84-88.
18. Napieiev S. M., Vigodin M. O., Myasnikov I. V. Obgruntuvannya ekonomichnoyi docilnosti zastosuvannya mizhramnoyi ogorozhi pidvishenoyi nesuchoyi zdatnosti [Substantiation of economic expediency of interframe fence of high carrying capacity] Problemi geoi-nzheneriyi ta pidzemnoyi urbanistiki [Proc. of the conf. "Problems of Geoengineering and Underground Urbanism"]. Kyjiv, 2018, pp. 56-59.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О. В. Солодянкін (Україна), д.т.н., проф. А. С. Саммаль (Російська Федерація)

Надійшла до редколегії 18.09.2018.

Прийнята до друку 22.10.2018.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.19.036.5-044.923:519.876

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, О. Л. ТЮТЬКІН<sup>2\*</sup>, О. Б. ХАВІН<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2\*</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> ТОВ «КИЇВМЕТРОПРОЕКТ», вул. Богдана Хмельницького, 16-22, Київ, Україна, 01030, тел. +38 (044) 484 40 94, ел. пошта A.Khavin@metroproekt.kiev.ua

### ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ПЕРЕГІННИХ ТУНЕЛІВ, ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ В РІЗНИХ РІВНЯХ

**Мета.** Створення методології розробки скінченно-елементних моделей для визначення напружено-деформованого стану (НДС) оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях. **Методика.** Застосування чисельного методу скінченних елементів для розрахунку НДС оправ перегінних тунелів по п'яти варіантам розташування, що знаходяться в різних рівнях. Розроблені об'ємні скінченно-елементні моделі на основі просторових елементів, що дозволяють врахувати розміщення перегінних тунелів в оточуючому масиві по глибині та відносно друг друга. **Результати.** Отримані ізолінії та ізополя напруженого і деформованого станів п'яти варіантів розташування перегінних тунелів. Встановлено, що розміщення перегінних тунелів безпосередньо один над одним та з деяким зміщенням по горизонталі не призводить до збільшення НДС і повністю відповідає потрібним значенням горизонтальних, вертикальних, поздовжніх і дотичних напружень в залізобетонній оправі з урахуванням різного виду навантажень. **Наукова новизна.** Висновки чисельного аналізу НДС п'яти скінченно-елементних моделей (п'яти варіантів) в програмного комплексу SCAD свідчать про достатній запас міцності бетону для всіх п'яти варіантів оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. **Практична значимість.** На основі результатів аналізу можна рекомендувати запроєктовані варіанти конструкцій, що мають високий рівень міцності, до впровадження оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, з метою суттєвого зменшення об'ємів використання підземного простору при спорудженні об'єктів метрополітену мілкого закладення в мегаполісах України.

*Ключові слова:* перегінні тунелі, що знаходяться в різних рівнях; мілке закладення; суцільно-секційна оправа; напруження, переміщення, напружено-деформований стан; метод скінченних елементів

#### Вступ

Тенденція зростання протяжності ліній мілкого закладення на мережах вітчизняних і зарубіжних метрополітенів, зокрема в м. Києві, обумовлена їх певними перевагами в порівнянні з лініями глибокого закладення [1-3]. Так, вартість ліній мілкого закладення у відносно сприятливих інженерно-геологічних та гідрологічних умовах в середньому в два рази менше, ніж ліній глибокого [4].

Техніко-економічні переваги ліній мілкого закладення і великі зручності в експлуатації відкривають широку перспективу їх розвитку в мережі як існуючих, так і знову споруджуваних метрополітенів. Аналіз досвіду будівництва метрополітенів доводить, що частка ліній міл-

кого закладення в загальній протяжності підземних транспортних магістралей переважною більшістю міст суттєво збільшується.

Зведення у котлованах перегінних тунелів мілкого закладення із суцільно-секційною оправою виключає специфічно трудомісткі процеси, властиві закритим умовам. З'являється можливість використання високопродуктивних машин і сучасного устаткування, впровадження суцільно-секційних збірних конструкцій. Усе це дозволяє істотно підвищити темпи будівництва на значному фронті робіт порівняно із закритим способом.

Водночас на період будівництва відчужуються тисячі квадратних метрів міської площі, порушується рух наземного транспорту, вини-

кає необхідність перекладання підземних комунікацій, а іноді й зносу розташованих у зоні будівництва споруд. Усі ці обставини, що негативно впливають на нормальні умови життя міста, повинні бути проаналізовані й враховані в ході розв'язання організаційних питань будівництва ліній метрополітену мілкого закладення відкритим способом.

Однією з прогресивних технологій будівництва метрополітену мілкого закладення, який на даний момент розвитку метрополітенів в Україні поступово застосовується, є спорудження перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях. Поки що надана технологія застосовується в обмежених обсягах, наприклад, у випадку, коли наземний простір, що відчужується на момент будівництва, є дуже обмеженим. Так, наприклад, при будівництві Київського метрополітену виникають ситуації, коли практично неможливо розмістити два перегінні тунелі один біля одного [5], або у випадку розгалуження ліній, що мають кардинально різний напрям [4].

Технологія спорудження перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, безсумнівно є прогресивною, оскільки повністю вписується в загальну концепцію освоєння підземного простору мегаполісів, одним із важливих аспектів якої є прагнення до економії як наземного, так і підземного просторів великих міст. Будівництво підземних споруд, що знаходяться в різних рівнях, зокрема перегінних тунелів, дозволяє ефективно економити наземний простір [6, 7].

### Мета

Але окрім переваг технології спорудження перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, існують і об'єктивні недоліки, що потребують їх усунення. Застосування конструкцій, що знаходяться в різних рівнях і взаємодіють із оточуючим масивом та складним комплексом навантажень (метропоїзд, рухоме навантаження), потребує нових конструктивних рішень. Причому ці нові підземні конструкції потребують наукового обґрунтування, оскільки вони не мають прямих аналогів, тобто пошук напружено-деформованого стану оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях,

є актуальною науково-технічною задачею, яка має також наукову новизну і практичне значення.

### Методика

Технологія спорудження перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, і підземних об'єктів метрополітену взагалі набула деякого поширення на лініях метрополітенів країн бывшего СРСР та світу. Але відсутність розроблених об'ємно-планувальних рішень та схем організації будівництва таких доволі складних об'єктів не дозволяє, не дивлячись на значні переваги наданих дворівневих конструкцій, застосовувати їх максимально широко. Аналіз радянського досвіду, а також сучасного досвіду будівництва метрополітенів країн близького зарубіжжя свідчить про те, що найбільш розробленими технологіями є такі, що торкаються саме станцій метрополітену глибокого і мілкого закладення, а не перегінних тунелів.

На лініях метрополітенів України підземні конструкції, що розташовуються в двох рівнях, представлені у вигляді станцій глибокого і мілкого закладення. В Київському метрополітені існування такого роду станцій обґрунтовується їх можливістю до перевлаштування у сполученні вузла пересадки та у більш ефективному регулюванні пасажиропотоками.

Дворівневі станції глибокого закладення на теренах бывшего СРСР дуже рідкі, хоча оригінальних проектів, зокрема архітектора Івана Таранова, було розроблено декілька десятків. Всього лиш одним випадком успішного спорудження була станція «Спортивна» (рос. Спортивная) Фрунзенсько-Приморської лінії Петербурзького метрополітену. Станція є вузлом пересадки і являє собою об'ємно-планувальне рішення у вигляді односклепінчастої станції глибокого закладення. У поперечному перерізі конструкція складається зі збірного залізобетонного багат шарнірного склепіння, що спирається на масивні опори, забетоновані всередині круглих тунелів діаметром 9,8 м. У нижній частині перетину побудовано зворотне склепіння, що слугує одночасно розпіркою для бічних опор. Станційні зали розділені міжповерховим перекриттям, що спирається на систему колон і прогонів. Конструктивна частина базується на досвіді спорудження односклепінчас-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

тої станції зі збірними залізобетонними склепіннями, обтиснутими в породу.

Однак було розроблено декілька оригінальних ідей щодо спорудження станцій глибокого закладення в якості вузлів пересадки, що мають дворівневе об'ємно-планувальне рішення. Так, архітектор та інженер Іван Георгійович Таранов запропонував ряд новаторських рішень для дворівневого планування станцій, хоча його проекти не були реалізовані. Станція «Київська» Арбатсько-Покровської лінії Московського метрополітену, яка побудована у вигляді пілонної станції і є вузлом пересадки, І. Г. Тарановим планувалася у вигляді дворівневої (навіть був побудований її макет).

І. Г. Тарановим був розроблений також ряд станцій («Площадь Ногина», «Таганская», «Пушкинская площадь», «Калужская застава», «Пироговская», «Краснопресненская», «Савеловский вокзал», «Ржевский вокзал», «Шарикоподшипник», «Серпуховская застава» та інші), які були б дворівневими в якості вузлів пересадки, причому автор навіть склав альбом типових рішень таких об'ємно-планувальних рішень.

Як відомо, дворівневе об'ємно-планувальне рішення для станційних підземних споруд є доволі розробленим і апробованим [8-10]. Разом з тим в окресленому обсязі надане рішення

для перегінних тунелів майже не застосовувалося, хоча його переваги, наприклад, у випадку мілкового закладення не потребують доказів (менша площа, що відчужується для будівництва, менші витрати на земляні роботи, більш економічне освоєння підземного простору тощо). Однак майже повна відсутність досвіду будівництва перегінних тунелів, що залягають в різних рівнях, пояснюється відсутністю наукового обґрунтування конструкцій, що проектується для такого типу об'ємно-планувальних рішень [8, 10]. Таким чином, на основі виконаного аналізу можна зробити наступний висновок, що ця наукова-технічна задача є актуальною для метрополітенів мегаполісів України.

## Результати

З метою розробки теоретичних положень ефективності розміщення перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, було створено 5 варіантів скінченно-елементних моделей (СЕ-моделей) (рис. 1-5) та виконаний їх чисельний аналіз з метою визначення НДС опор. Створення СЕ-моделей проводиться для того, щоб відтворити взаємодію оточуючого масиву в розрахунковому комплексі SCAD [11, 12], оскільки рішення такої складної задачі неможливе в аналітичному вигляді [13].

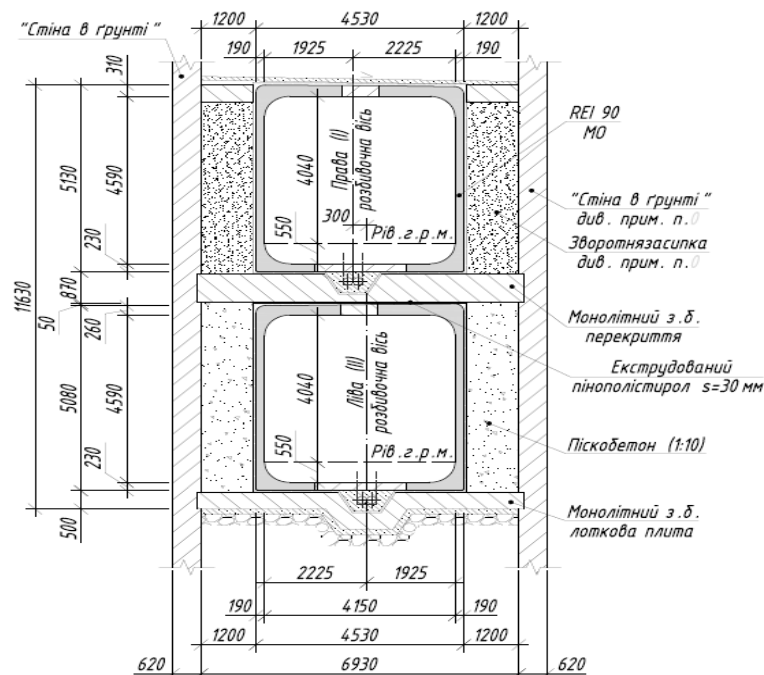


Рис. 1. Опори перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях (Варіант 1)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

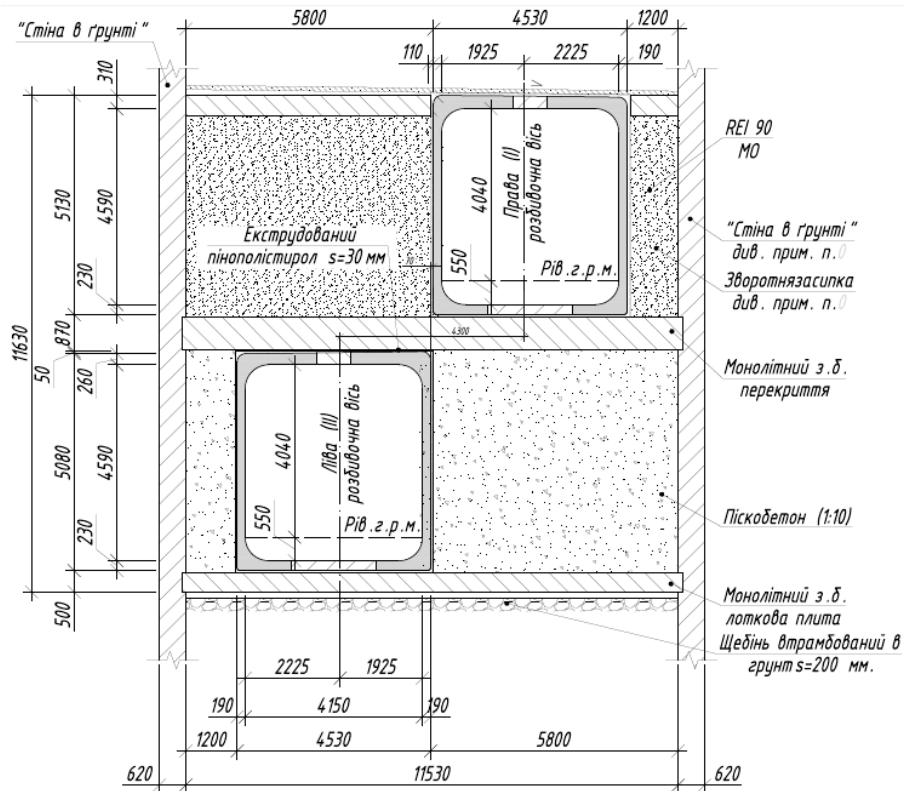


Рис. 2. Оправи перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях (Варіант 2)

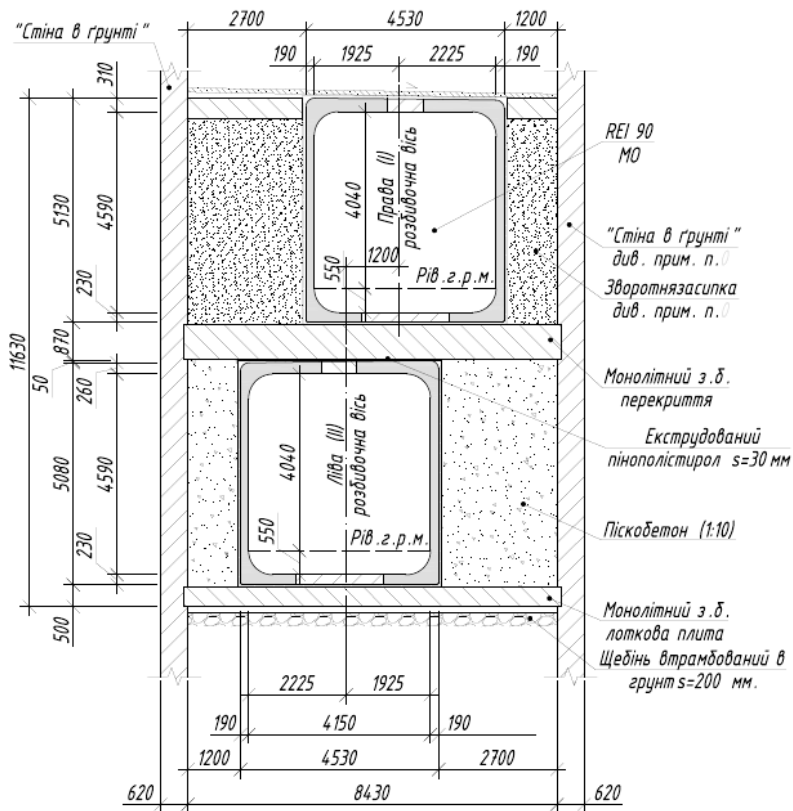


Рис. 3. Оправи перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях (Варіант 3)

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

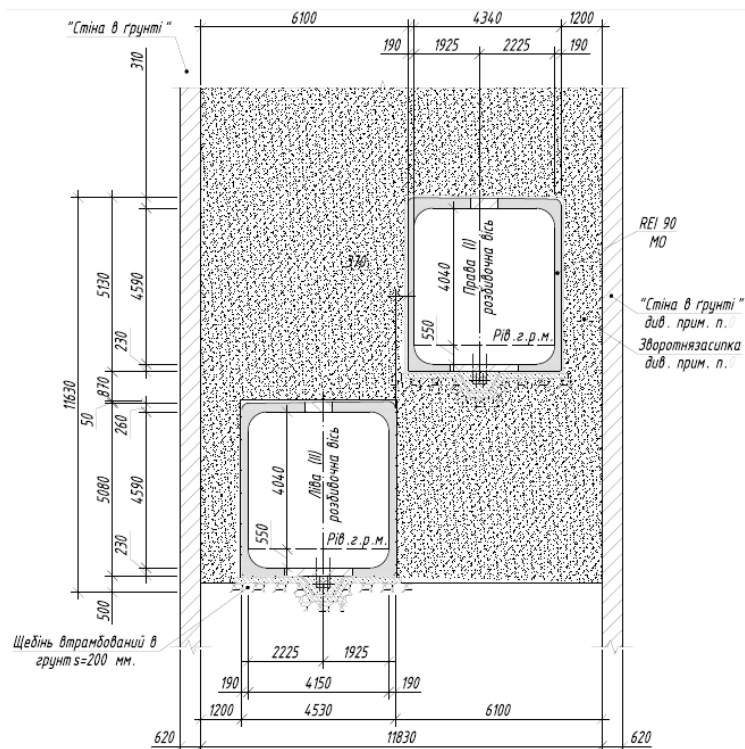


Рис. 4. Оправи перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях (Варіант 4)

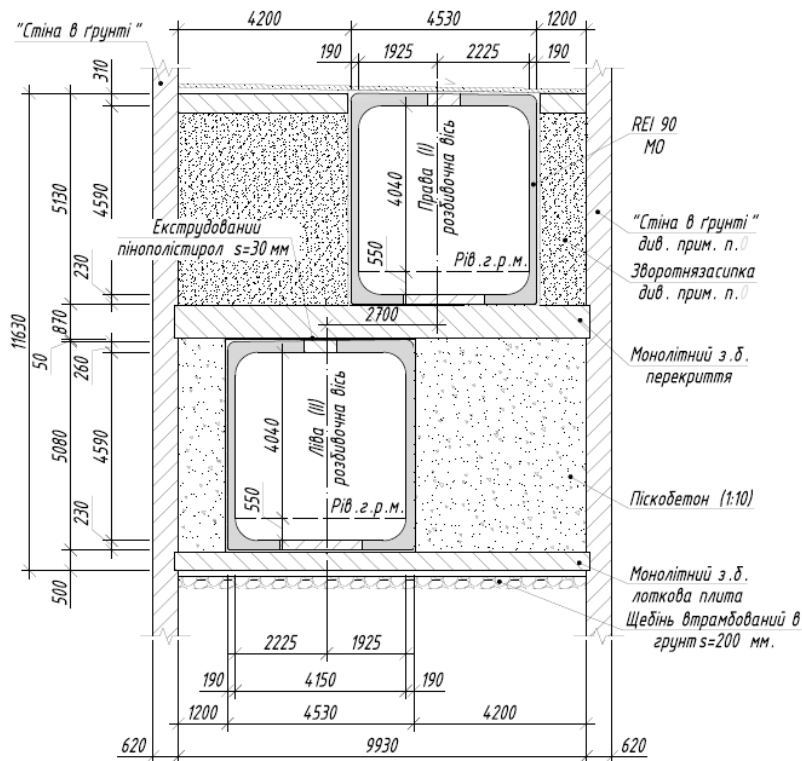


Рис. 5. Оправи перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях (Варіант 5)

Розроблені СЕ-моделі засновані на об'ємних скінченних елементах типу гексаєдрів та тетраєдрів (Варіант 1: 40011 вузлів, 27206 скінченні елементи; Варіант 2: 43686 вузлів, 29716 скінченні елементи; Варіант 3: 48216 вузлів, 32714 скінченні елементи; Варіант 4: 30063 вузлів, 19812 скінченні елементи; Варіант 5: 30561 вузлів, 20242 скінченні елементи; зменшення кількості СЕ в Варіантах 4-5 пов'язане із збільшенням їх розміру для знаходження всіх варіантів в одній розмірності задачі), і повно відображає взаємну роботу оправи із оточуючим масивом [11, 14].

Визначені деформаційні характеристики скінченно-елементної моделі наступні: жорсткість 1 (грунт [15]; піскобетон не враховується, його міцність йде у запас) – модуль пружності  $E=30$  МПа, коефіцієнт Пуассону  $\mu=0,3$ , питома вага  $\gamma=18,5$  кН/м<sup>3</sup>; жорсткість 2 (залізобетон) – приведений модуль пружності – 36 000 МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,2$ , питома вага  $\gamma=24,5$  кН/м<sup>3</sup>; жорсткість 3 (бетон ВБШ) – модуль пружності  $E=21$  000 МПа, коефіцієнт Пуассону  $\mu=0,2$ , питома вага  $\gamma=24$  кН/м<sup>3</sup>.

Після надання деформаційних характеристик на модель накладалися граничні умови. Навантаженнями на модель були наступні [16]: 1. Метропоїзд. Статичне навантаження від нормативного вертикального значення (150 кН на кожну вісь) було перетворене на динамічне шляхом введення коефіцієнта динамічності  $\mu=1,5$ , тобто розрахункове вертикальне значення метропоїзду сягало 225 кН (112,5 кН на колесо). 2. НК-80. 3. Власна вага масиву (товщина зворотної засипки – 5 м) і бетонних / залізобетонних елементів (із коефіцієнтом перевантаження 1,1).

Окрім поодиноких навантажень, були проведені розрахунки на комбінації навантажень: 1 комбінація – власна вага із коефіцієнтом перевантаження 1,1, метропоїзд зверху, метропоїзд знизу, НК-80 (найбільш критичне навантаження, надалі результати НДС наводяться саме по ній); 2 комбінація – метропоїзд зверху, метропоїзд знизу, НК-80 (комбінація для з'ясування впливу оточуючого масиву); 3 комбінація – метропоїзд зверху, метропоїзд знизу (комбінація для з'ясування впливу метропоїзду).

Після створення геометрії, завдання навантажень та граничних умов, СЕ-моделі варіантів оправ перегінних тунелів, що знаходяться в рі-

зних рівнях, піддавалися розрахунку мультифронтальним методом, а їх результати детально аналізувалися.

Результати чисельного аналізу НДС наведені в Розділі 3 поваріантно.

#### Варіант 1.

НДС оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, є складним та асиметричним (рис. 6), оскільки формується несиметричною комбінацією навантажень, що в подальших варіантах проявляється ще явніше.

Аналіз горизонтальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -4,3 мм; 2 комбінація – -3,3 мм; 3 комбінація – -1,1 мм; максимальні значення в оправі (стіна верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -1,3 мм; 2 комбінація – -0,7 мм; 3 комбінація – -0,4 мм.

Аналіз вертикальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -93,1 мм; 2 комбінація – -54,9 мм; 3 комбінація – -9,7 мм; максимальні значення в оправі (шеліга склепіння верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -49,8 мм; 2 комбінація – -14,8 мм; 3 комбінація – -9,7 мм (лоток нижнього тунелю).

Аналіз горизонтальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -4,80 МПа; 2 комбінація – -4,11 МПа; 3 комбінація – -4,18 МПа.

Аналіз вертикальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -11,3 МПа; 2 комбінація – -7,5 МПа; 3 комбінація – -7,5 МПа. Аналіз поздовжніх напружень свідчить, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -2,64 МПа; 2 комбінація – -2,32 МПа; 3 комбінація – -2,34 МПа.

Аналіз дотичних напружень свідчить, що їх максимальні значення: 1 комбінація – -1,99 МПа; 2 комбінація – -1,27 МПа; 3 комбінація – -1,26 МПа.

Такі значення компонент напруженого стану свідчать про достатній запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа.

Висновком щодо Варіанту 1 на основі аналізу його НДС є те, що він відповідає умовам міцності при наявності вказаних комбінацій навантажень.

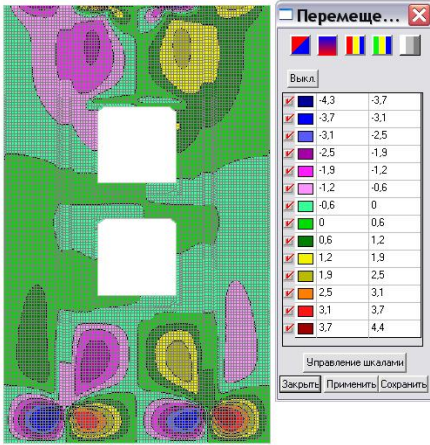
МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

**Варіант 2**

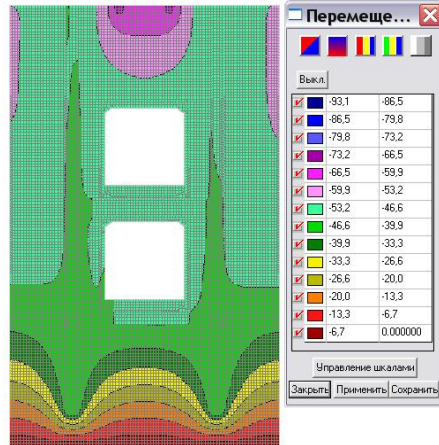
НДС опор перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, є більш асиметричним

(рис. 7), ніж в Варіанті 1, оскільки формується несиметрична комбінація навантажень проявляється явніше.

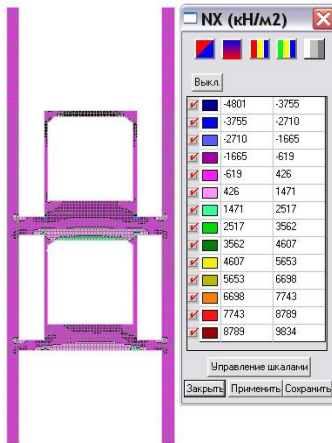
Горизонтальні переміщення (мм)



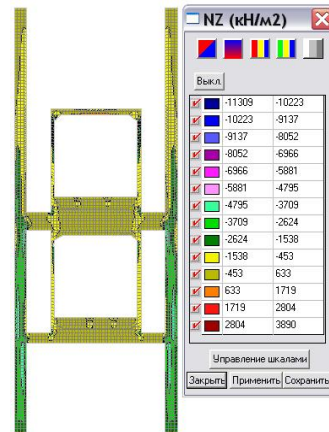
Вертикальні переміщення (мм)



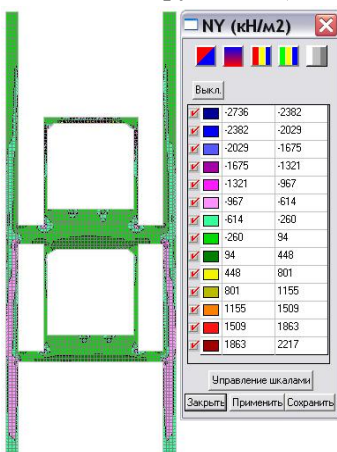
Горизонтальні напруження (кН/м<sup>2</sup>)



Вертикальні напруження (кН/м<sup>2</sup>)



Поздовжні напруження (кН/м<sup>2</sup>)



Дотичні напруження XZ (кН/м<sup>2</sup>)

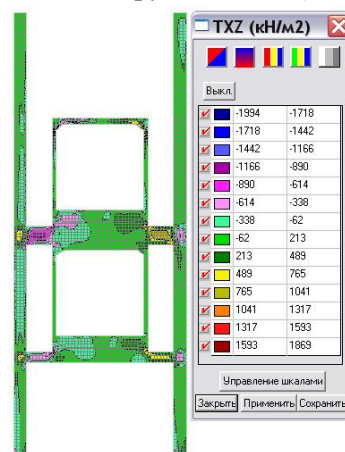


Рис. 6. Ізолінії та ізополя деформаційного стану моделі і напруженого стану фрагменту моделі (конструкція) (Варіант 1)

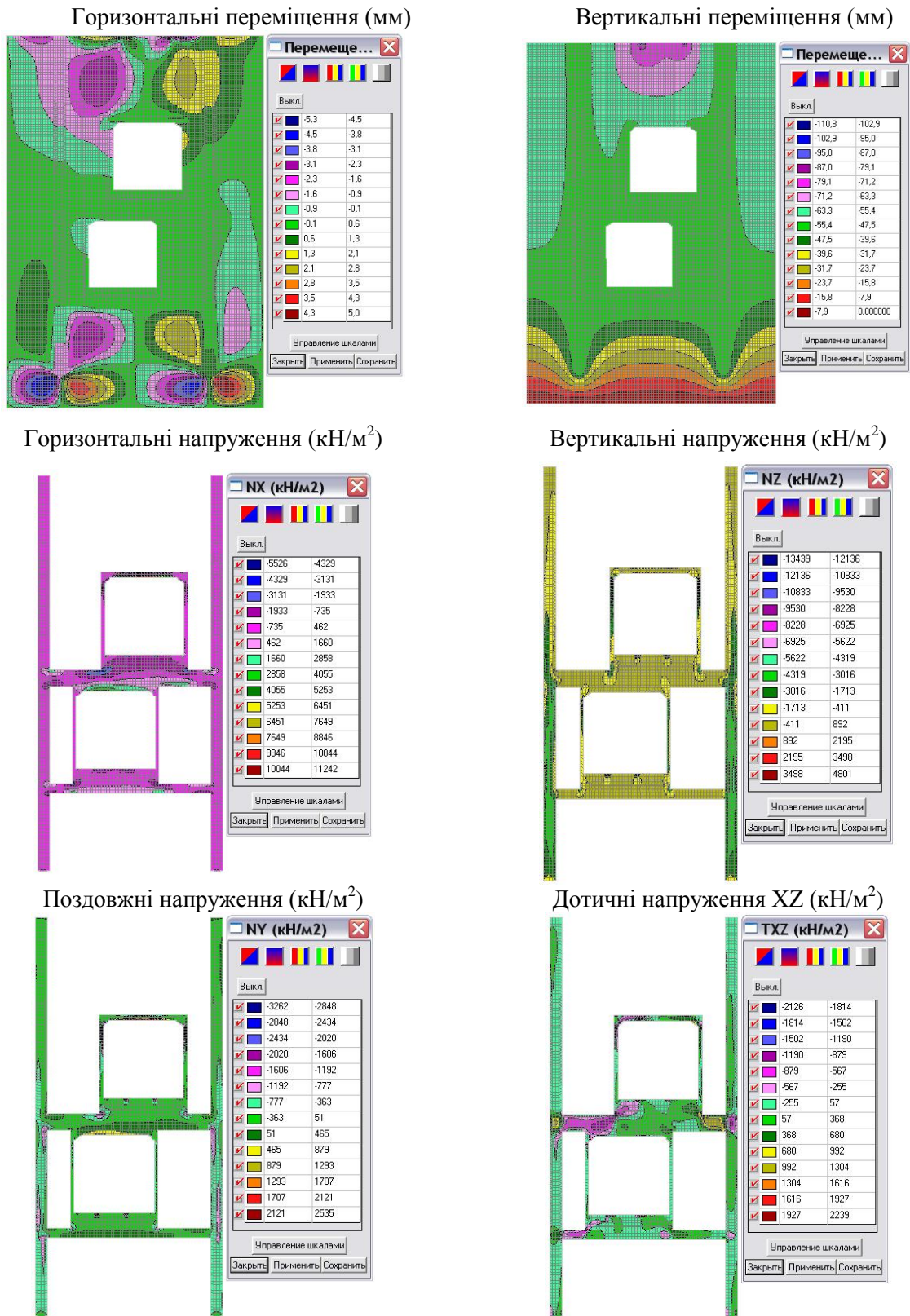


Рис. 7. Ізолінії та ізополя деформаційного стану моделі і напруженого стану фрагменту моделі (конструкція) (Варіант 2)

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Аналіз горизонтальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -5,3 мм; 2 комбінація – -4,2 мм; 3 комбінація – -1,2 мм; максимальні значення в оправі (стіна верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -1,5 мм; 2 комбінація – -0,8 мм; 3 комбінація – -0,6 мм. Аналіз вертикальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -110,8 мм; 2 комбінація – -64,3 мм; 3 комбінація – -10,6 мм; максимальні значення в оправі (шелига склепіння верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -57,3 мм; 2 комбінація – -16,2 мм; 3 комбінація – -10,6 мм (лоток нижнього тунелю).

Аналіз горизонтальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -5,53 МПа; 2 комбінація – -4,19 МПа; 3 комбінація – -4,15 МПа. Такі значення свідчать про значний запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Аналіз вертикальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення наступні: 1 комбінація – -13,4 МПа; 2 комбінація – -7,54 МПа; 3 комбінація – -7,54 МПа. Такі значення компонент напруженого стану свідчать про достатній запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Аналіз поздовжніх напружень свідчить, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -3,26 МПа; 2 комбінація – -2,34 МПа; 3 комбінація – -2,33 МПа. Аналіз дотичних напружень свідчить, що їх максимальні значення: 1 комбінація – -2,13 МПа; 2 комбінація – -1,36 МПа; 3 комбінація – -1,27 МПа. Висновком щодо Варіанту 2 на основі аналізу його НДС є те, що він відповідає умовам міцності при наявності вказаних комбінацій навантажень.

**Варіант 3**

НДС оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, є більш асиметричним (рис. 8), ніж в Варіантах 1 і 2, оскільки формується несиметрична комбінація навантажень, що проявляється ще явніше. Аналіз горизонтальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -5,9 мм; 2 комбінація – -4,4 мм; 3 комбінація – -1,2 мм; максимальні значення в оправі (стіна верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -1,5 мм; 2 комбінація – -1,0 мм; 3 комбінація – -0,6 мм. Аналіз вертикальних перемі-

щень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -113,5 мм; 2 комбінація – -64,2 мм; 3 комбінація – -10,3 мм; максимальні значення в оправі (шелига склепіння верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -58,5 мм; 2 комбінація – -15,8 мм; 3 комбінація – -10,3 мм (лоток нижнього тунелю).

Аналіз горизонтальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -6,1 МПа; 2 комбінація – -4,49 МПа; 3 комбінація – -4,31 МПа. Такі значення свідчать про значний запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Аналіз вертикальних напружень свідчить (рис. 3.13) про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -14,54 МПа; 2 комбінація – -13,1 МПа; 3 комбінація – -7,54 МПа. Аналіз поздовжніх напружень свідчить, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -3,54 МПа; 2 комбінація – -2,39 МПа; 3 комбінація – -2,36 МПа. Аналіз дотичних напружень свідчить, що їх максимальні значення: 1 комбінація – -2,32 МПа; 2 комбінація – -1,35 МПа; 3 комбінація – -1,29 МПа. Такі значення компонент напруженого стану свідчать про достатній запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Висновком щодо Варіанту 3 на основі аналізу його НДС є те, що він відповідає умовам міцності при наявності вказаних комбінацій навантажень.

**Варіант 4**

НДС оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, є більш асиметричним (рис. 9), ніж в Варіантах 1-3, оскільки формується несиметрична комбінація навантажень проявляється ще явніше. Аналіз горизонтальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -6,1 мм; 2 комбінація – -4,3 мм; 3 комбінація – -1,2 мм; максимальні значення в оправі (стіна верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -1,7 мм; 2 комбінація – -1,1 мм; 3 комбінація – -0,7 мм. Аналіз вертикальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -110,0 мм; 2 комбінація – -58,1 мм; 3 комбінація – -10,1 мм; максимальні значення в оправі (шелига склепіння верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -59,6 мм; 2 комбінація – -15,3 мм; 3 комбінація – -10,1 мм (лоток нижнього тунелю).

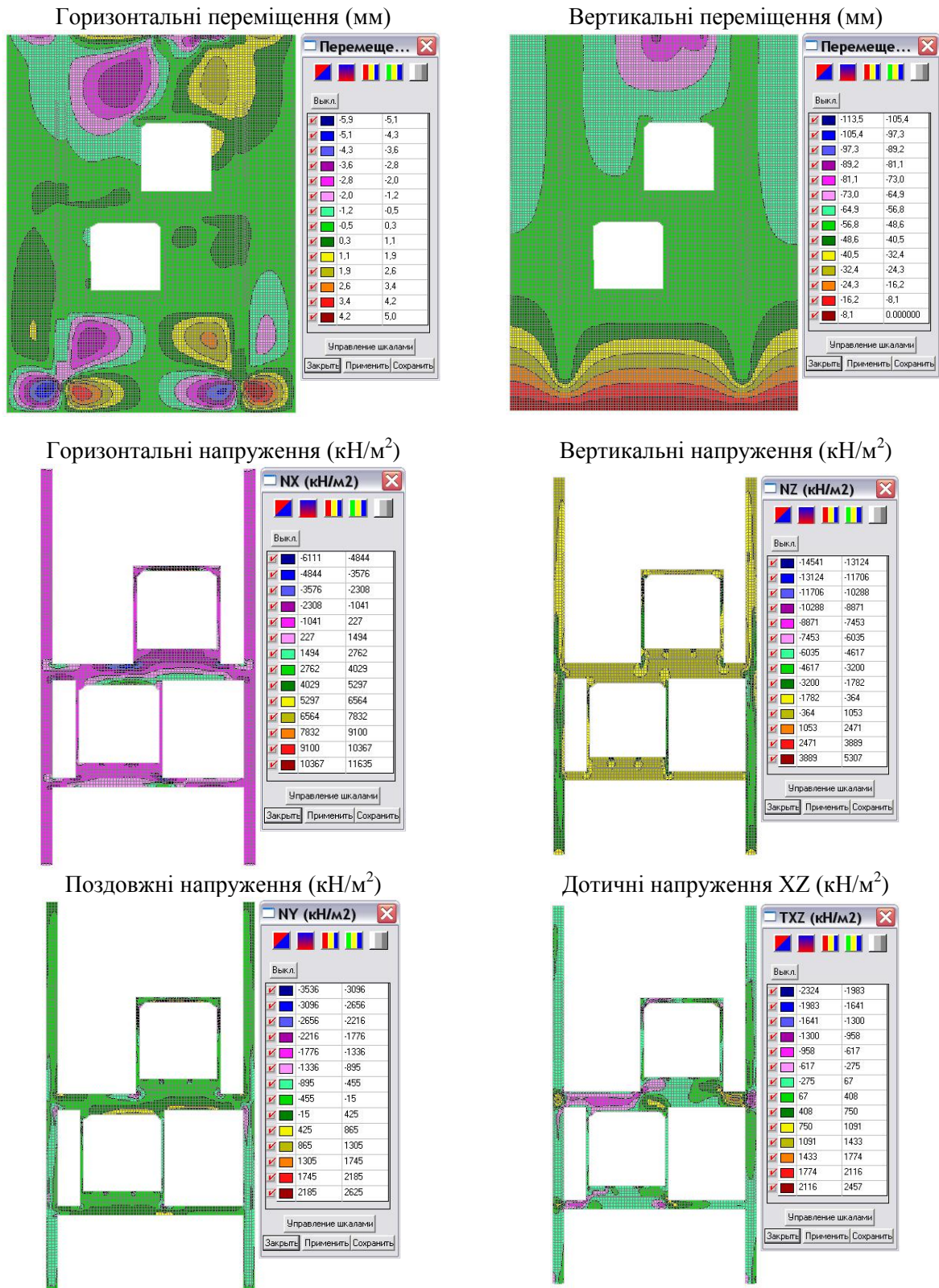


Рис. 8. Ізолінії та ізополі деформаційного стану моделі і напруженого стану фрагменту моделі (конструкція) (Варіант 3)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

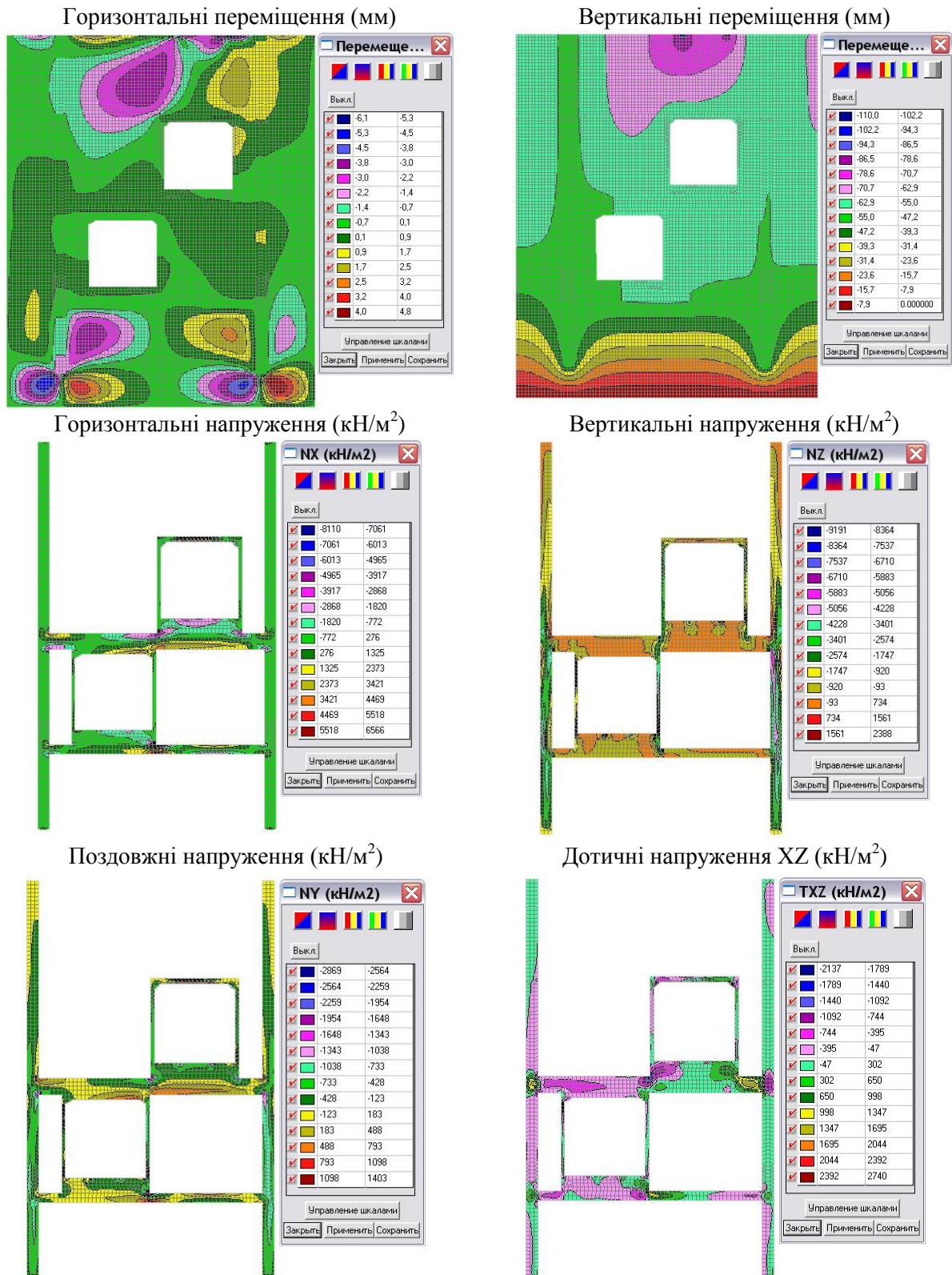


Рис. 9. Ізолінії та ізополя деформаційного стану моделі і напруженого стану фрагменту моделі (конструкція) (Варіант 4)

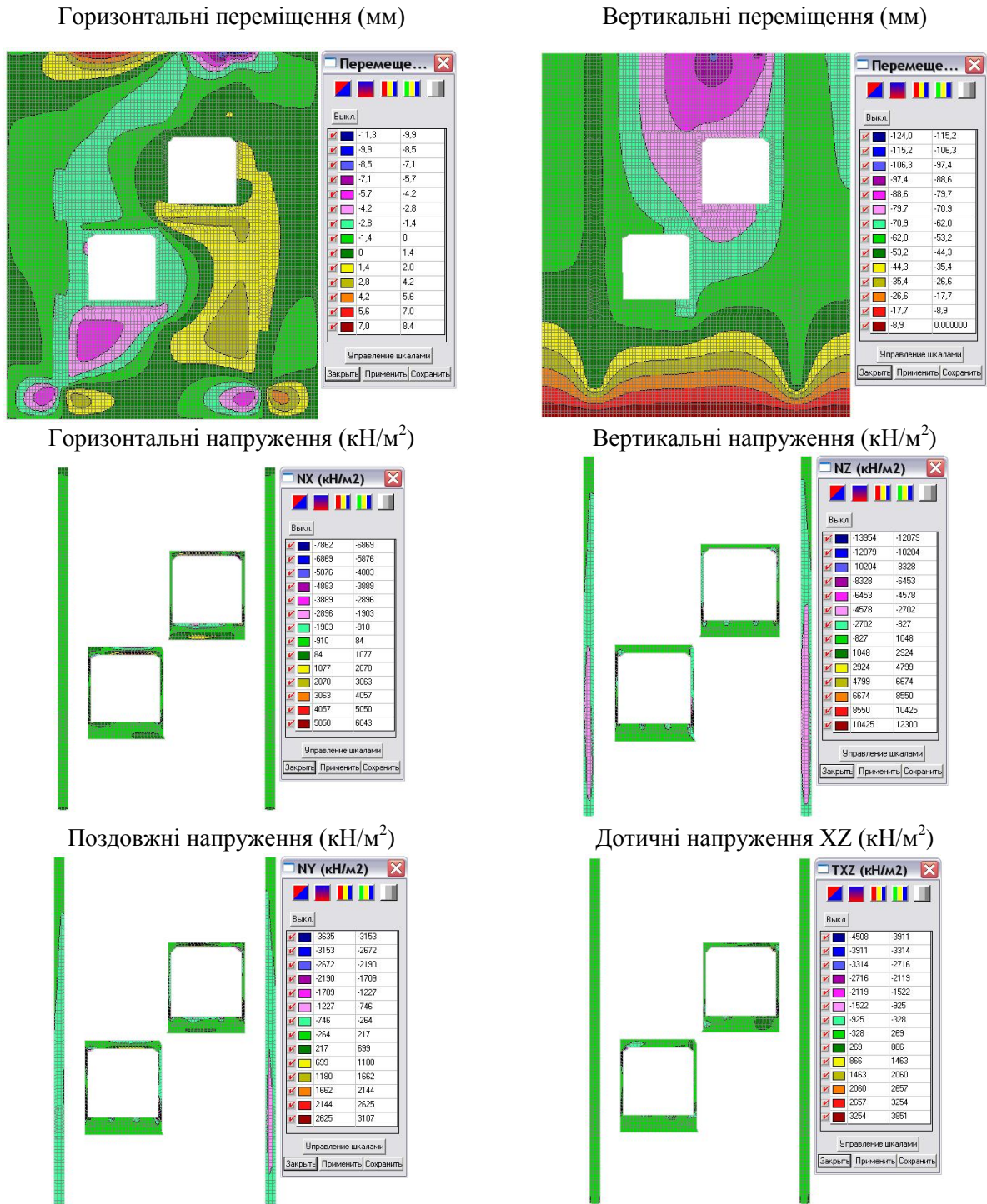


Рис. 10. Ізолінії та ізополя деформаційного стану моделі і напруженого стану фрагменту моделі (конструкція) (Варіант 5)

Аналіз горизонтальних напружень (свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -8,11 МПа; 2 комбінація – -4,1 МПа; 3 комбінація – -3,18 МПа. Такі значення свідчать про значний запас міцності бетону,

оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Аналіз вертикальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -9,19 МПа; 2 комбінація – -4,9 МПа; 3 комбінація – -

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

4,87 МПа. Аналіз поздовжніх напружень свідчить, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -2,87 МПа; 2 комбінація – -1,64 МПа; 3 комбінація – -1,61 МПа. Аналіз дотичних напружень свідчить, що їх максимальні значення: 1 комбінація – -2,14 МПа; 2 комбінація – -1,34 МПа; 3 комбінація – -0,96 МПа. Такі значення компонент напруженого стану свідчать про достатній запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Висновком щодо Варіанту 4 на основі аналізу його НДС є те, що він відповідає умовам міцності при наявності вказаних комбінацій навантажень.

**Варіант 5**

НДС оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, є максимально асиметричним (рис. 10), ніж в Варіантах 1-4, оскільки формується несиметрична комбінація навантажень проявляється ще явніше на відміну Варіанту 4. Аналіз горизонтальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -11,3 мм; 2 комбінація – -6,9 мм; 3 комбінація – -2,4 мм; максимальні значення в оправі (стіна верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -4,0 мм; 2 комбінація – -2,3 мм; 3 комбінація – -1,5 мм. Аналіз вертикальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -124,0 мм; 2 комбінація – -64,5 мм; 3 комбінація – -16,4 мм; максимальні значення в оправі (шеліга склепіння верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -77,3 мм; 2 комбінація – -23,9 мм; 3 комбінація – -16,4 мм (лоток верхнього тунелю).

Аналіз горизонтальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -7,86 МПа; 2 комбінація – -3,2 МПа; 3 комбінація – -3,55 МПа. Такі значення свідчать про значний запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Аналіз вертикальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -13,9 МПа; 2 комбінація – -6,6 МПа; 3 комбінація – -4,9 МПа. Аналіз поздовжніх напружень свідчить, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -3,64 МПа; 2 комбінація – -1,78 МПа; 3 комбінація – -1,69 МПа. Аналіз дотичних напружень свідчить, що їх максимальні значення: 1 комбінація – -4,5 МПа; 2 комбінація – -2,38

МПа; 3 комбінація – -1,41 МПа. Такі значення компонент напруженого стану свідчать про достатній запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Висновком щодо Варіанту 5 на основі аналізу його НДС є те, що він відповідає умовам міцності при наявності вказаних комбінацій навантажень.

**Наукова новизна та практична значимість**

Висновки чисельного аналізу напружено-деформованого стану п'яти скінченно-елементних моделей (п'яти варіантів) в програмному комплексі SCAD свідчать про достатній запас міцності бетону для всіх п'яти варіантів оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа.

На основі результатів аналізу можна рекомендувати запроєктовані варіанти конструкцій, які мають високий рівень міцності, до впровадження оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, з метою суттєвого зменшення об'ємів використання підземного простору при спорудженні об'єктів метрополітену мілкового закладення мегаполісів України.

**Висновки**

Проаналізовано ряд підземних споруд метрополітену з дворівневим об'ємно-планувальним рішенням, зокрема станцій мілкового та глибокого закладення, і зроблено висновок, що дворівневе об'ємно-планувальне рішення для перегінних тунелів, відмічене явними перевагами, детально не розроблювалося, що є актуальною науково-технічною задачею для метрополітенів мегаполісів України. Виявлено концептуальні основи спорудження мілко-закладених об'єктів метрополітену і розроблено методику створення скінченно-елементних моделей для числового аналізу перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях. Також розроблено практичний детальний алгоритм математичного моделювання в комплексі StructureCAD (SCAD), оснований на автоматичній тріангуляції замкнутої області довільної форми на площині, що є одним з найбільш універсальних засобів формування сіток скінченних елементів.

На основі розроблених авторами методики і алгоритму чисельного аналізу створено п'ять просторових скінченно-елементних моделей оправ перегінних тунелів, що знаходяться в рі-

зних рівнях, які максимально повно відображають складну геометрію варіантів, їх конструктивні особливості, інженерно-геологічні умови та комплекс навантажень (власна вага масиву і конструкцій, метропоїзд, рухоме навантаження НК-80) та їх комбінації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Петренко, В. И. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине [Текст] / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин. – Днепропетровськ : Наука і освіта, 2005. – 252 с.
- Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів (у 3-х частинах). Навчальний посібник. Частина 2 [Текст] / Ю. М. Айвазов. – Київ : НТУ, 2009. – 216 с.
- Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів (у 3-х частинах). Навчальний посібник. Частина 1 [Текст] / Ю. М. Айвазов. – Київ : НТУ, 2006. – 166 с.
- Фролов, Ю. С. Метрополитены на линиях мелкого заложения. Новая концепция строительства [Текст] / Ю. С. Фролов, Ю. Е. Крук. – Москва : ТИМР, 1994. – 202 с.
- Петренко, В. Д. Обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепи [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, В. И. Петренко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 1. – С. 75-81.
- Sterling, R. Underground space design [Текст] / R. Sterling. – New York : Van Norstrand Reinhold, 1993. – 370 p.
- Fotieva, N. Design of shallow tunnel linings / N. Fotieva, N. Bulychiev, A. Sammal // Proc. of the ISRM International Symposium, Torino, Italy. – Rotterdam: Balkema, 1996. – pp. 654-661.
- Баклашов, И. В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей [Текст] / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. – Москва : Недра, 1984. – 415 с.
- Гарбер, В. А. Научные основы проектирования тоннельных конструкций с учетом технологии их сооружения. В 2-х томах [Текст] / В. А. Гарбер. – Москва : АО ЦНИИС, 1996, т.1. – 170 с.
- Макаров, О. М. Транспортные тоннели и метрополитены [Текст] / О. М. Макаров, В. Е. Меркин. – Москва : ТИМР, 1991. – 171 с.
- SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер и др. – Киев : ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
- Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
- Петренко, В. Д. Експериментальні дослідження теорії гірського та гідростатичного тиску на щит при проходці в слабких водонасичених грунтах [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, О. М. Кулаженко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2016. – Вип. 9. – С. 32-41.
- Hamid Chakeri Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling [Text] / Hamid Chakeri, Rohola Hasanpour, Mehmet Ali Hindistan, Bahtiyar Ünver – Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 2011, Vol. 70, issue 3, p. 439-448.
- Справочник по механике и динамике грунтов [Текст] / под ред. В. Б. Швеца. – Киев : Будівельник, 1987. – 232 с.
- ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 195 с.

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, А. Л. ТЮТЬКИН<sup>2\*</sup>, А. Б. ХАВИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, эл. почта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2\*</sup> Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> ООО «КИЕВМЕТРОПРОЕКТ», ул. Богдана Хмельницкого, 16-22, Киев, Украина, 01030, тел. +38 (044) 484 40 94, эл. почта A.Khavin@metroproekt.kiev.ua

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ, НАХОДЯЩИХСЯ В РАЗНЫХ УРОВНЯХ

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

**Цель.** Создание методологии разработки конечно-элементных моделей для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) обделок перегонных тоннелей, находящихся в разных уровнях. **Методика.** Применение численного метода конечных элементов для расчета НДС обделок перегонных тоннелей по пяти вариантам расположения, находящихся в разных уровнях. Разработаны объемные конечно-элементные модели на основе пространственных элементов, позволяющих учесть размещение перегонных тоннелей в окружающем массиве по глубине и относительно друг друга. **Результаты.** Полученные изолинии и изополя напряженного и деформированного состояний пяти вариантов расположения перегонных тоннелей. Установлено, что размещение перегонных тоннелей непосредственно друг над другом и с некоторым смещением по горизонтали не приводит к увеличению НДС и полностью соответствует требуемым значениям горизонтальных, вертикальных, продольных и касательных напряжений в железобетонной обделке с учетом различного вида нагрузок. **Научная новизна.** Выводы численного анализа НДС пяти конечно-элементных моделей (пяти вариантов) в программном комплексе SCAD свидетельствуют о достаточном запасе прочности бетона для всех пяти вариантов оправ перегонных тоннелей, находящихся в разных уровнях, поскольку расчетная прочность для бетона класса В30 составляет 21 МПа. **Практическая значимость.** На основе результатов анализа можно рекомендовать запроектированные варианты конструкций, имеющих высокий уровень прочности, к внедрению обделок перегонных тоннелей, находящихся в разных уровнях, с целью существенного уменьшения объемов использования подземного пространства при сооружении объектов метрополитена мелкого заложения в мегаполисах Украины.

*Ключевые слова:* перегонные тоннели, находящиеся в разных уровнях; мелкое заложение; цельносекционная обделка; напряжения; перемещения; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов

V. D. PETRENKO<sup>1</sup>, O. L. TIUTKIN<sup>2\*</sup>, A. B. KHAVIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2\*</sup> Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> «KIEVMETROPROEKT» LTD, Bohdana Khmelnytskogo Str., 16-22, Kiev, Ukraine, 01030, tel. +38 (044) 484 40 94, e-mail A.Khavin@metroproekt.kiev.ua

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE RUNNING TUNNELS STRUCTURES IN DIFFERENT LEVELS

**Purpose.** Creation of the methodology for the development of finite element models for determining the stress-strain state (SSS) of lining tunnels located in different levels. **Methodology.** The application of the numerical finite element method for calculating the SSS of the lining of the running tunnels according to five variants of their location at different levels. The volume finite-element models are developed on the basis of spatial elements, allowing to take into account the location of the running tunnels in the surrounding massif in depth and relatively to each other. **Findings.** Obtained isolines and contour plots of strained and deformed states of five variants of the location of the running tunnels. It is established that the placement of the running tunnels directly above each other and with some horizontal displacement does not lead to an increase of SSS and fully corresponds to the required values of horizontal, vertical, longitudinal and shear stresses in reinforced concrete lining, taking into account the different types of loads. **Originality.** Conclusions of the numerical analysis of the SSS of five finite element models (five variants) in the SCAD program complex indicate to a sufficient margin of concrete strength for all five variants of the tunnels located at different levels, since the calculated strength for concrete of the class В30 is 21 МПа. **Practical value.** On the basis of the analysis results, it is possible to recommend designed versions of structures having a high level of strength to the introduction of running tunnels located at different levels, in order to significantly reduce the using of underground space under construction of subway facilities in shallow contour interval in megalopolises of Ukraine.

*Keywords:* running tunnels; located in different levels; shallow contour interval; all-section lining; tensions; displacement; stress-strain state; finite element method

REFERENCES

1. Petrenko V. I., Petrenko V. D., Tjut'kin A. L., Sovremennye tehnologii stroitel'stva metropolitenov v Ukraine [Modern technologies of building subways in Ukraine], *Nauka i osvita – Science and education*, 2005, 252 p.
2. Ajvazov Ju. M. Proektuvannja metropoliteniv (u 3-kh chastynakh). Navchal'nyj posibnyk. Chastyna 2 [Design of subways (in 3 parts). Tutorial. Part 2]. Kyjiv, NTU Publ., 2009. 216 p.
3. Ajvazov Ju. M. Proektuvannja metropoliteniv (u 3-kh chastynakh). Navchal'nyj posibnyk. Chastyna 1 [Design of subways (in 3 parts). Tutorial. Part 1]. Kyjiv, NTU Publ., 2006. 166 p.
4. Frolov Ju. S., Ju. E. Kruk Metropoliteny na linijah melkogo zalozhenija. Novaja koncepcija stroitel'stva [Subways on small lines. New construction concept]. Moscow, TIMR Publ., 1994. 202 p.
5. Petrenko V. D., Tjut'kin A. L., Petrenko V. I. Obzor analiticheskikh i jeksperimental'nyh metodov issledovanija vzaimodejstvija massiva i krepі [A review of analytical and experimental methods for studying the interaction of an array and a support]. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka –Bridges and tunnels : theory, research, practice*, 2012, issue 1, pp. 75-81.
6. Sterling R. Underground space design. New York, Van Norstrand Reinhold Publ., 1993. 370 p.
7. Fotieva N., Bulychev N., Sammal A. Design of shallow tunnel linings. *Proc. of the ISRM International Symposium, Torino, Italy*. Rotterdam, Balkema Publ., 1996. pp. 654-661.
8. Baklashov I. V., Kartoziya B. A. Mehanika podzemnyh sooruzhenij i konstrukcii krepей [Mechanics of underground structures and construction of supports]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 415 p.
9. Garber V. A. Nauchnye osnovy proektirovanija tonnel'nyh konstrukcij s uchetom tehnologii ih so-oruzhenija. V 2-h tomah [Scientific basis for designing tunnel structures taking into account the technology of their construction. In 2 volumes]. Moscow, AO CNIIS Publ., 1996, vol.1. 170 p.
10. Makarov O. M., Merkin V. E. Transportnye tonneli i metropoliteny [Transport tunnels and subways]. Moscow, TIMR Publ., 1991. 171 p.
11. Karpilovskiy V. S., Kriksunov E. Z., Perelmutter A. V. i dr. *SCAD dlya polzovatelya* [SCAD user]. Kyjiv, VVP «Kompas» Publ., 2000. 332 p.
12. Perelmutter A. V., Slivker V. I. *Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost ikh analiza* [Computational models of structures and the possibility of their analysis]. Kyjiv, Stal Publ., 2002. 600 p.
13. Petrenko V. D., Tjut'kyn A. L., Kulazhenko O. M. Eksperymentaljni doslidzhennja teorij ghirsjkogho ta ghidrostatychnogho tysku na shhyt pry prokhodci v slabkykh vodonasychenykh gruntakh [Experimental studies of theories of mountain and hydrostatic pressure on the shield during passage in weak water-soaked soils]. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka –Bridges and tunnels : theory, research, practice*, 2016, issue 9, pp. 32-41.
14. Hamid Chakeri Rohola Hasanpour, Mehmet Ali Hindistan, Bahtiyar Ünver Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Berlin, Springer Berlin Heidelberg Publ., 2011, Vol. 70, issue 3, p. 439-448.
15. Spravochnik po mehanike i dinamike gruntov [Handbook on mechanics and soil dynamics]. Pod red. Shveca V. B. Kyjiv, Budivel'nyk Publ., 1987, 232 p.
16. *DBN V.2.3-7-2010. Sporudy transportu. Metropoliteny* [State Standard V.2.3-7-2010. Transport construction. Undergrounds], Kyjiv, DP Ukrarkhbudininform Publ., 2011, 195 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. М. Біляєвим, д.т.н, проф. Й. Й. Лучко

Надійшла до редколегії 07.07.2018

Прийнята до друку 22.10.2018

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.873:625.1-049.32

О. П. СЕВЕРИН<sup>1</sup>, С. О. ЯКОВЛЄВ<sup>2\*</sup>, О. І. ШАПТАЛА<sup>3</sup>, І. Є. КРАМАР<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Кафедра військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел.+38 (056) 793 19 19, ел. пошта severinlist@gmail.com, ORCID 0000-0001-9967-4731

<sup>2\*</sup> Кафедра військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел.+38 (056) 793 19 19, ел. пошта weis23649@gmail.com, ORCID 0000-0002-6431-4303

<sup>3</sup> Кафедра військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна, 49010, тел.+38(056) 793 19 19, ел. пошта Shaptala100@meta.com, ORCID 0000-00031675-1450

<sup>4</sup> Кафедра військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна, 49010, тел. +38(056) 793-19-19, ел. пошта Kramar066@meta.ua, ORCID 0000-00035875-1360

### УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОНТОННИХ СЕКЦІЙ НАПЛАВНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО МОСТУ (НЗМ-56)

**Мета.** Модернізація технологічного процесу обслуговування понтонних секцій НЗМ-56 в ПТОР військової частини з метою продовження їх експлуатаційного терміну придатності. **Методика.** Прикладні дослідження. **Результати.** Розроблено технологічний процес і нові засоби для обслуговування понтонних секцій комплексу наплавного мосту НЗМ-56. **Наукова новизна.** Новизна полягає в тому, що технологія процесу обслуговування понтонних секцій НЗМ-56 в ПТОР військової частини запропонована і апробована вперше в частинах Держспецтрансслужби. **Практична значимість.** Отримані результати технологічного процесу будуть впроваджені в технологічний процес військовими частинами Держспецтрансслужби при проведенні технічного обслуговування і постановки секцій понтонів, інвентарю і елементів мостів НЗМ-56 на різні види зберігання.

*Ключові слова:* наплавний залізничний міст НЗМ-56; понтон; пункт технічного обслуговування і ремонту; колійний візок; технологічний процес

#### Вступ

Ремонт, обслуговування і утримання наплавного мосту НЗМ-56 є комплексом робіт, направлених на підтримку і поліпшення первинних експлуатаційних якостей як мосту в цілому, так і його окремих елементів і споруд. Роботи по обслуговуванню і ремонту наплавного мосту розділяються на наступні види: обслуговування, поточний ремонт, капітальний ремонт. При і капітальному ремонті наплавного мосту виконуються роботи, що вимагають припинення експлуатації переправи в цілому, або ремонтних технічних засобів у складі переправи, використання стаціонарного спеціального устаткування або залучення для виконання робіт спеціалізованих підприємств, які в Україні відсутні. Слід зазначити що виведений з експлуатації наплавний міст терміном понад місяць,

потребує обслуговування і постановки на різні види зберігання [1, 4].

В Збройних Силах України, Державній спеціальній службі транспорту до теперішнього часу відсутні ремонтні заводи та спеціально обладнані пункти технічного обслуговування і ремонту (далі ПТОР) для наплавних мостів НЗМ-56, а сам технологічний процес обслуговування і постановки на зберігання понтонних секцій не відповідає вимогам сьогодення.

Підвищити довговічність наплавних мостів НЗМ-56 за рахунок проведення ремонтних робіт, технічного обслуговування елементів комплексу мосту дозволить застосування модернізованого ПТОР військової частини, а також удосконаленого технологічного процесу проведення ремонтних робіт. Кафедрою військової підготовки спеціалістів Держспецтрансслужби сумісно з інженерами управління військової

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

частини розроблені рекомендації щодо технологічного процесу модернізації ПТОР однієї з військових частин, а також практичні рекомендації що до удосконалення раніш розроблених методик технічного обслуговування, викладених в «Технічному опису і інструкції по монтажу, перевозці, зберіганню і експлуатації» 1977 року.

З цією метою проведено комплекс експериментальних досліджень щодо модернізації ПТОР військової частини і технологічного процесу переміщення понтонних секцій з площадки зберігання до площадки перевантаження, також проведені дослідно-експериментальні роботи для проведення робіт в цілому з обслуговування понтонних секцій.

В результаті досліджень проведено модернізацію приміщення ПТОР, дослідно-експериментальним шляхом визначено і проведено підбір відповідних механізмів і устаткування для забезпечення виконання заходів комплексного технічного обслуговування комплексу НЗМ-56, відповідно до нормативно - технічної документації. Базуючись на цих дослідженнях були також розроблені методичні рекомендації та технологічні карти технологічного процесу обслуговування понтонних секцій в ПТОР військової частини.

**Мета**

Удосконалення і модернізація технологічного процесу обслуговування понтонних секцій наплавного залізничного мосту НЗМ-56 в ПТОР військової частини, з метою продовження їх експлуатаційного терміну придатності.

**Методика**

Застосовувалась пошуково-прикладна, дослідно-експериментальна, практична методика досліджень щодо створення нової технології та нових способів, запропонованих на основі практичних досліджень технологічного процесу обслуговування понтонних секцій комплексу НЗМ-56 в ПТОР військової частини.

Дослідними елементами і зразками були, секція понтону наплавного залізничного мосту НЗМ-56, шляховий візок ПТ-13, ПТОР військової частини, засоби кріплення понтону, фіксуючий пристрій понтону, інші технічні засоби і механізми забезпечення методики дослідження.

Матеріальна частина наплавного залізничного мосту НЗМ-56 зберігається відповідно «Технічному опису і інструкції по монтажу, перевозці, зберіганню і експлуатації» 1977 року на території парку військової частини. В склад комплексу НЗМ-56 входить 240 понтонів, які розділені на секції. Для зручності зберігання і транспортування, а також виконання заходів дослідження, понтон розділений на три секції: носову, середню і кормову, які складаються у відповідній послідовності в три яруси (рис. 1) [4].



Рис. 1. Секції понтонів на об'єкті зберігання

Розміщення, зберігання секцій понтонів, наявність значних інтервалів між площадками складування забезпечує навантаження на автотранспорт (АНС-5) секцій понтонів автомобільним краном вантажопідйомністю не менше 10 т. Для проведення досліджень застосовувались дві одиниці автомобільних кранів КС-4561 (рис. 2) [4, 5].



Рис. 2. Автомобільний кран КС-4561

Для транспортування матеріальної частини секції понтонів на площадку перевантаження з

метою технічного обслуговування і ремонту застосовується автопоїзд АНС-5 (рис. 3).



Рис. 3. Транспортування секцій понтона на автопоїзді АНС-5

В той же час для транспортування понтону в ПТОР і виконання заходів з технічного обслуговування понтонів застосовувався двовісний колійний візок ПТ-13 (рис. 4).

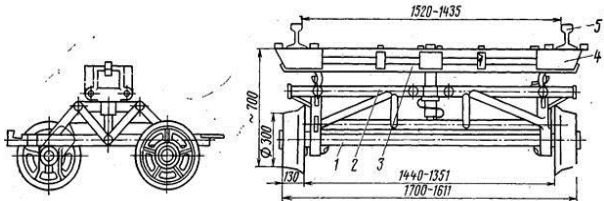


Рис. 4. Двовісний колійний візок ПТ-13

Комплекс експериментальних досліджень з усіх видів комплексного технічного обслуговування комплексу матеріальної частини НЗМ-56, проводився на модернізованому переобладнаному стаціонарному пункті технічного обслуговування і ремонту (ПТОР) військової частини (рис. 5 та рис. 6).



Рис. 5. Пункт технічного обслуговування і ремонту (ПТОР) військової частини



Рис. 6. Пункт технічного обслуговування і ремонту (ПТОР) військової частини

## Результати

За результатами досліджень проведено ряд технічно-експлуатаційних робіт з модернізації приміщення ПТОР, підготовки колійного візка ПТ-13, засобів кріплення понтону, майданчика перевантаження понтонів та інші технологічні роботи, пов'язані з забезпеченням виконання заходів технічного обслуговування і ремонту секції понтонів НЗМ-56.

### 1. Модернізація наявного ПТОР (рис. 5, рис. 6) включає:

а) встановлення в ПТОР, включаючи майданчик перевантаження, ділянки рельсової колії довжиною 25 м для двовісного колійного візка з метою переміщення понтонів до ПТОР. Основними вимогами до устрою колії в ПТОР є:

- типи рейок, можуть встановлюватися Р-43 і вище;
- шпали дерев'яні, залізобетонні; число шпал на одну ланку – 40;
- ширина колії на дерев'яних і залізобетонних шпалах між внутрішніми гранями головок рейок має бути 1520 мм. Допуск по розширенню колії +8 мм; по звуженню колії – 4 мм (п.3.9. ПТЕ залізниць України) (рис. 7);

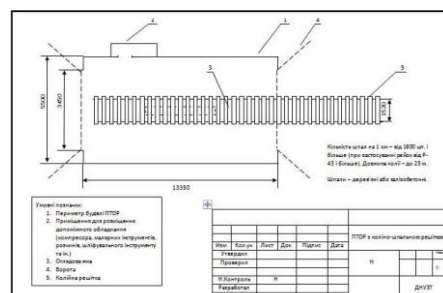


Рис. 7. ПТОР з вкритою залізничною колією в складі рейко-шпальної решітки довжиною 25 м (для переміщення колійного візка з понтоном)

б) обладнання ПТОР для виконання малярних робіт.

**2. Підготовка майданчика перевантаження понтонів з АНС-5 на двовісний колійний візок.**

Для перевантаження понтонів з АНС-5 на двовісний колійний візок ПТ-13, підготовлений спеціально обладнаний майданчик, який розташовується безпосередньо біля ПТОР. Майданчик повинен відповідати всім вимогам і правилам міжгалузевих норм і правил з охорони праці щодо спеціальних майданчиків з рівним твердим покриттям або ґрунтом, здатним сприймати навантаження від вантажів і підйомно-транспортних машин. Майданчик для навантажувально-розвантажувальних робіт повинен мати ухил не більше 3°. При устрою майданчика дотримувалися основних вимог НПАОП 0.00-1.01-07 «Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів» та наказу МЕВП України від 19.01.2015 р. № 21(НПАОП 0.00-1.75-15) [5, 6].

**3. Підбір, підготовка засобів кріплення понтону.**

З метою дотримання заходів безпеки при транспортуванні понтону до ПТОР на двовісному візку ПТ-13 з площадки перевантаження, а в подальшому, для безпечного виконання робіт з обслуговування частин понтону в положенні на «борту», необхідно мати пристрої і деталі для фіксації і кріплення понтону (рис. 8, позиція 1- 4).

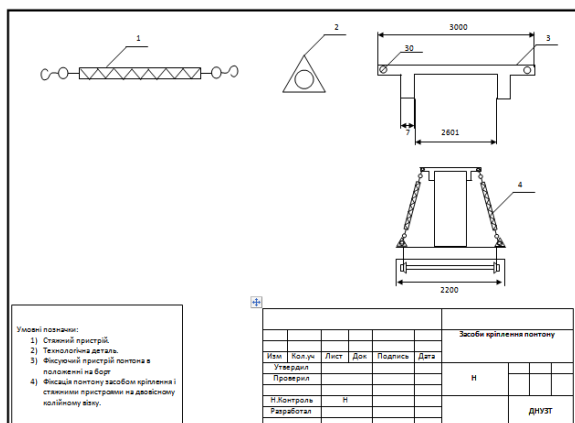


Рис. 8. Засоби кріплення понтону

Для фіксації понтону в горизонтальному положенні, а по мірі виконання робіт з технічного обслуговування, в положенні на «борту» в ході проведення досліджень застосовувалися ланцюгові стяжні пристрої відповідних стандарт-

них норм і типів (рис. 8, позиція 1; 2; 3; 4), а також інші фіксуєцькі засоби, в тому числі цепні пристрої і стяжні ремні (рис. 9).



Рис. 9. Цепні пристрої і стяжні ремні

Для стійкого утримання понтону в положенні «на борту» крім ланцюгових стяжок був розроблений фіксуєцький пристрій понтону (див. рис. 8 позиція 3, рис. 10).

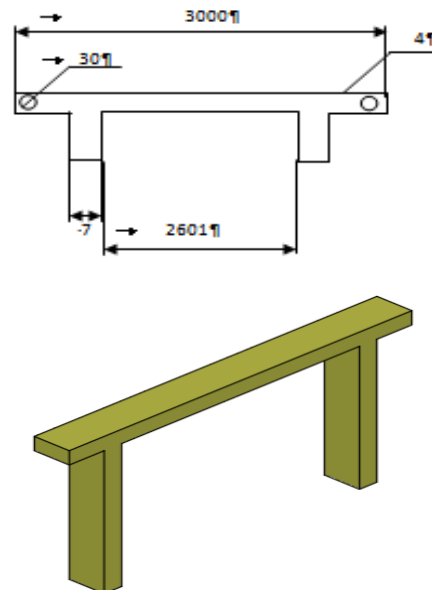


Рис. 10. Фіксуєцький пристрій понтона

Фіксуєцький пристрій понтону представляє собою «П-образну» зварювальну конструкцію з металевого швелеру П-10, в якості головної горизонтальної конструкції розташованої полицями вниз з технологічними отворами діаметром 30 мм на відстані 40 мм з обох кінців профілю [7].

Для якісного виконання робіт, бездоганного виконання заходів безпеки, зниження простою і витрат на технічне обслуговування людських і матеріальних ресурсів запропоновано організувати технологічний процес обслуговування понтонних секцій в ПТОР військової частини за суміщеною схемою. Вказана схема технічного обслуговування поряд з іншими схемами (спеціалізований, роздільний – потоковим методом) виправдовує себе наступними чинниками:

- усі роботи виконуються на одному робочому пості (працює бригада в складі 3-6 військовослужбовців);
- невелика виробнича програма (3- 4 операції);
- робочі пости спеціалізуються на визначених роботах;
- для поточного обслуговування при невеликому залученні особового складу, техніки, механізмів, обладнання [12, 13].

Недоліки:

- слабка продуктивність в зв'язку з обмеженою можливістю механізації трудомістких і спеціальних операцій а також залучення особового складу більш високої кваліфікації.

Виходячи з отриманих результатів дослідження, технологічний процес обслуговування понтонних секцій в ПТОР військової частини пропонується організувати в чотири етапи:

I етап. Навантаження понтонів на майданчиках зберігання на напівпричеп АНС-5 і переміщення до площадки перевантаження біля ПТОР.

II етап. Розвантаження понтонів на майданчику перевантаження на двовісний колійний візок, переміщення в ПТОР.

III етап. Основні роботи технологічного процесу обслуговування і підготовки до довготривалого зберігання понтонів.

IV етап. Навантаження понтонів на майданчику перевантаження на напівпричеп АНС-5 і переміщення до майданчика зберігання.

Варто відмітити, що в ході проведення апробаційних робіт по проведенню технічного обслуговування елементів НЗМ-56 із виконанням технічно-експлуатаційних робіт проведено:

- модернізацію приміщення ПТОР;
- застосування для переміщення елементів НЗМ-56 двовісного колійного візка ПТ-13;
- підбір фіксуєючих пристроїв;

- запровадження суміщеної схеми технічного обслуговування елементів НЗМ -56.

В результаті впровадження вказаних засобів і матеріальних засобів вдалося досягти позитивних результатів з гранично малими економічно-фінансовими витратами.

### Наукова новизна

Вперше запропонована методика технологічного процесу обслуговування понтонних секцій в ПТОР військової частини.

### Практична значимість

Отримані результати технологічного процесу будуть впроваджені в технологічний процес військовими частинами Держспецтрансслужби при проведенні технічного обслуговування і постановки секцій понтонів, інвентарю і елементів мостів НЗМ-56 на різні види зберігання.

### Висновки

В результаті досліджень і в ході проведення апробаційних робіт технічного обслуговування елементів НЗМ-56 із застосуванням додаткового обладнання і впровадження суміщеної схеми технічного обслуговування елементів наплавного мосту вдалося досягти позитивних результатів в умовах значних економічних обмежень з гранично малими економічно-фінансовими витратами для військової частини.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Державна спеціальна служба транспорту – історія і сьогодення. Перспективи та пріоритети розвитку [Текст] : монографія кол. авт. / наук. ред. А. В. Радкевич. – Дніпропетровськ : 2013. – 203 с.
2. ДСТУ-Н Б. В.2.3-23:2009. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів [Текст]. – На заміну ВБН В.3.1-218-174-2002 Мости та труби.
3. Оцінка технічного стану автодорожніх мостів, що експлуатуються [Текст]; – Надано чинності 2009-11-11. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 49 с.
4. Коваль, П. М. Характеристика технічного стану існуючих мостів України [Текст] / П. М. Коваль// Дороги і мости. – 2003. – С. 15-22.
5. Наплавной железнодорожный мост НЗМ-56. Техническое описание и инструкция по монта-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- жу, перевозке, хранению и эксплуатации [Текст] / Главное упр. ж.-д. войск. – Москва : Военное изд-во, 1977. – 343 с.
6. Солдатов, К. И. Перспективы модернізації конструкцій наплавних мостів НЖМ-56 [Текст] / К. И. Солдатов, Ю. М. Горбатюк // Державна спеціальна служба транспорту - історія і сьогодення. Перспективи та пріоритети розвитку : монографія кол. авт. / наук. ред. А. В. Радкевич. - Дніпропетровськ : Вид-во Маковецький, 2013. – С. 123-143.
  7. Солдатов, К. И. Шляхи удосконалення конструкції наплавних мостів [Текст] / К. И. Солдатов, Ю. М. Горбатюк // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2014. – Вип. 5. – С. 92-97.
  8. Експериментальні дослідження роботи сталевих двотаврових тонкостінних балок з поперечно гофрованими стінками [Текст] / О. О. Нілов, Т. О. Білопуп, Т. О. Нілова, М. В. Лазнюк // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського, Випуск 15. – Київ : Видавництво «Сталь», 2014. – С. 62-70.
  9. ВСН 136-78 Инструкция по проектированию вспомогательных сооружений и устройств для строительства мостов [Текст]. – Введено 1978-01-06. – Москва : Минтрансстрой, 2001. – 300 с.
  10. ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1R-06 – ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2006. – 44 p.
  11. Adel ElSafti, Brahim Benmokrahe, Sami Rizkalla Degradation Assessment of Internal Continuous Fiber Reinforcement in Concrete Environment: Materials Research Report – University of North Florida. – UNF Projekt Contract No. BDK 82 № 977 – 05. – 2013. – 398 p.
  12. CAN/CSA-S806-02 “Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers”, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (May 2002).
  13. Computation of Impact Factor of High-Speed Railway Bridge by KTX Train Riding Test / Hyejin Yoon, Won Jong Chin, Jae Yoon Kang, Jongwon Kwark, Eui-Seung Hwang // Engineering. – 2013. – № 5. – pp. 751-755.
  14. UK Military Bridging – Floating Equipment / posted by Think Defence. – 2011. – Режим доступа : <http://www.thinkdefence.co.uk/2011/12/uk-military-bridging-floating-equipment/>. – Загл. с экрана.

А. П. СЕВЕРИН<sup>1</sup>, С. А. ЯКОВЛЕВ<sup>2\*</sup>, А. И. ШАПТАЛА<sup>3</sup>, И. Е. КРАМАР<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Кафедра военной подготовки специалистов Государственной специальной службы транспорта Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. + 38 (056) 793 19 19, эл. почта severinlist@gmail.com, ORCID 0000-0001-9967-4731

<sup>2\*</sup>Кафедра военной подготовки специалистов Государственной специальной службы транспорта Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. + 38 (056) 793 19 19, эл. почта weis23649@gmail.com, ORCID 0000-0002-6431-4303

<sup>3</sup>Кафедра военной подготовки специалистов Государственной специальной службы транспорта Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, 49010, Украина, 49010, тел. + 38 (056) 793 19 19, эл. почта Shaptala100@meta.com, ORCID 0000-00031675-1450

<sup>4</sup>Кафедра военной подготовки специалистов Государственной специальной службы транспорта Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, 49010, Украина, 49010, тел. + 38 (056) 793 19 19, эл. почта Kramar066@meta.ua, ORCID 0000-00035875-1360

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОНТОННЫХ СЕКЦИЙ НАПЛАВНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО МОСТА (НЖМ-56)

**Цель.** Модернизация технологического процесса обслуживания понтонных секций НЖМ-56 в ПТОРе воинской части с целью продления их эксплуатационного срока годности. **Методика.** Прикладные исследования. **Результаты.** Разработан технологический процесс и новые средства для обслуживания понтонных секций комплекта наплавного моста НЖМ-56. **Научная новизна.** Новизна заключается в том, что технология процесса обслуживания понтонных секций НЖМ-56 в ПТОРе воинской части предложена и опробована впервые в частях Госспецтрансслужбы. **Практическая значимость.** Полученные результаты технологического процесса будут внедрены в технологический процесс воинскими частями Госспецтрансслужбы при проведении технического обслуживания и постановки секций понтонов, инвентаря и элементов мостов НЖМ-56 на различные виды хранения.

*Ключевые слова:* наплавной железнодорожный мост НЖМ-56; понтон; пункт технического обслуживания и ремонта; путевая тележка; технологический процесс

A. P. SEVERIN<sup>1</sup>, S. A. YAKOVLEV<sup>2\*</sup>, A. I. SHAPTALA<sup>3</sup>, I. E. KRAMAR<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department military training specialists of the State special transport service of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 793 19 19, e-mail severinlist@gmail.com, ORCID 0000-0001-9967-4731

<sup>2\*</sup> Department military training specialists of the State special transport service of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 793 19 19, e-mail weis23649@gmail.com, ORCID 0000-0002-6431-4303

<sup>3</sup> Department military training specialists of the State special transport service of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 793-19-19, e-mail Shaptala100@meta.com, ORCID 0000-00031675-1450

<sup>4</sup> Department military training specialists of the State special transport service of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 793 19 19, e-mail Kramar066@meta.ua, ORCID 0000-00035875-1360

## IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF MAINTENANCE OF PONTOON SECTIONS OF FLOATING RAILWAY BRIDGE (NZHM-56)

**Purpose.** The modernization of maintenance technological process for pontoon sections of NZM-56 in PTOR of military unit with the purpose of their fitness operating period extension. **Methodology.** Applied researches. **Findings.** A technological process and new facilities are designed for maintenance of pontoon sections of floating bridge NZM-56. **Originality.** A novelty consists in that the technology of maintenance of pontoon sections of NZM-56 in PTOR of military sub-unit has been offered and tested first in military unit of the State special railway transport (SSRT). **Practical value.** The obtained results of technological process will be inculcated in the technological process by military units of SSRT during conducting of the technical maintenance and raising of pontoon sections stock, inventory and elements of bridges of NZM-56 on the different types of storage.

*Keywords:* floating railway bridge of NZM-56; pontoon; point of technical maintenance and repair; railway light truck; technological process

### REFERENCES

1. Derzhavna spetsialna sluzhba transportu – istoriia i sohodennia. Perspektyvy ta priorytety rozvytku [State Special Transport Service - History and Present. Prospects and Development Priorities. Monograph Count. Aut.], monohrafiia kol. avt. Nauk. red. A. V. Radkevych. Dnepropetrovsk, 2013. 203 p.
2. DSTU-N B. V.2.3-23:2009. Sporudy transportu. Nاستanova z otsiniuvannia i prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv [DSTU-N B. V.2.3-23:2009. Constructions of transport. Guidelines for estimating and forecasting the technical condition of road bridges]. Na zaminu VBN V.3.1-218-174-2002 Mosty ta truby. Kyjiv, Minrehionbud Ukrayiny Publ., 2009. 73 p.
3. Otsinka tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv, shcho ekspluatuiutsia [Estimation of the technical condition of the used road bridges]. Kyjiv, Minrehionbud Ukrayiny Publ., 2009. 49 p.
4. Kovalj P. M. Kharakterystyka tekhnichnoho stanu isnujuchykh mostiv Ukrainy [Description of the technical state of the existing bridge Ukraine]. *Doroghy i mosty – Road and bridge*, 2003, pp. 15-22.
5. Naplavnoi zheleznodorozhnyi most NZM-56. Tekhnicheskoe opysanye y ynstruktsyia po montazhu, perevozke, khranenyiu y ekspluatatsy [Floating railway bridge NZM-56. Technical description and instructions for installation, transportation, storage and operation]. Hlavnoe upr. zh.-d. voisk. Moscow, Military Publ., 1977. 343 p.
6. Soldatov K. I., Gorbatyuk Yu. M. Perspektivi modernizatsiy konstruksiy naplavnykh mostiv NZM-56 [Prospects for upgrading the structures of the NZM-56 floating bridges. Monograph Count. Aut.], monohrafiia kol. avt. Nauk. red. A. V. Radkevych. Dnepropetrovsk, 2013. pp. 123-143.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

7. Soldatov K. I., Gorbatyuk Yu. M. Shliakhy udoskonalennia konstruktsii naplavnykh mostiv [Ways of improving the construction of floating bridges]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2014, issue 5, pp.92-97.
8. Nilov O. O., Bilopup T. O., Nilova T. O., Lazniuk M. V. Eksperymentalni doslidzhennia roboty stalevykh dvo-tavrovykh tonkostinnykh balok z poperechno hofrovanymu stinkamy [Experimental studies of steel double-walled thin-walled beams with transverse corrugated walls]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho instytutu stalevykh konstruktsii im. V. M. Shymanovskoho*. Kyjiv, Steel Publ., issue 15, 2014. pp. 62-70.
9. VSN 136-78 *Ynstruktsyia po proektyrovanyiu vspomohatelnykh sooruzhenyi y ustroistv dlia stroytelstva mostov* [VSN 136-78 Instructions for designing auxiliary structures and bridges]. Moscow, Mintradestroy Publ., 2001. 300 p.
10. ACI 440. 1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRPBars, ACI 440.1R-06 – ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2006. 44 p.
11. Adel ElSafti, Brahim Benmokrahe, Sami Rizkalla Degradation Assessment of Internal Continuous Fiber Reinforcement in Concrete Environment. Materials Reseach Report, University of Nort Florida. UNF Projekt Contract No. BDK 82, № 977 – 05. 2013. 398 p.
12. CAN/CSA-S806-02, Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers, *Canadian Standards Association*, Toronto, Ontario, Canada, (May 2002).
13. Hyejin Yoon, Won Jong Chin, Jae Yoon Kang, Jongwon Kwark, Eui-Seung Hwang Computation of Impact Factor of High-Speed Railway Bridge by KTX Train Riding Test. *Engineering*, 2013. № 5. pp. 751-755.
14. UK Military Bridging - Floating Equipment. Posted by Think Defence. 2011. Available at: <http://www.think-defence.co.uk/2011/12/uk-military-bridging-floating-equipment/>.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. І. Нетеса, д.т.н, проф. А. В. Ра-  
джевич*

Надійшла до редколегії 14.09.2018.

Прийнята до друку 22.10.2018.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.09.-136.1:[625.1:519.876.5]

V. V. MAROCHKA<sup>1</sup>, S. H. BOBOSHKO<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department «Bridges and tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 83 10, e-mail markay905@gmail.com, ORCID 0000-0001-8856-5708

<sup>2\*</sup> Department «Bridges and tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 83 10, e-mail stepanboboshko@gmail.com, ORCID 0000-0002-7612-0696

### DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF ARRANGING AREAS WITH TRANSITIONAL STIFFNESS INDEX ON APPROACHES TO RAILWAY BRIDGES

**Purpose.** To investigate the issue of transitional rigidity on the railways of Ukraine, to form a complex of existing measures to strengthen the transitional sections, to develop and justify the solution to the problem of transitional stiffness on approaches to railway bridges. **Methodology.** Theoretical research methods analysis and synthesis has been used. For mathematical modeling of the structure, a finite element method has been used - a three-dimensional mathematical model was created with stiffnesses corresponding to real ones, and loaded by static load of the rolling stock. **Findings.** The analysis of the literature and the experience of developed countries on the issue of arranging areas with transitional stiffness index on approaches to railway bridges, proposed and developed a solution for amplifying sections with transitional stiffness, a theoretical calculation of the mathematical model of the corresponding areas was developed the working draft for arranging areas with transitional stiffness index on approaches to railway bridges has been designed. **Originality.** The technology of amplification of areas with transitional stiffness has been proposed, a model of a section with a transitional stiffness index has been developed and constructed in the first approximation. **Practical value.** Developed construction of soil-cement piles allows to enhance areas with transitional stiffness index on approaches to railway bridges. The obtained data open up new possibilities in the experimental study of areas with a transitional stiffness index.

*Keywords:* transitional stiffness; approaches; embankment, abutment, soil-cement; mathematical model

#### Introduction

There are more than 21 879 km of ground canvas in Ukraine, that includes about 19500 artificial structures with a total length of more than 625 km.

An analysis of the experience of railways operation in the US, Europe and Australia showed that as of 2006, about 50% of approaches to bridges have local under-depths from 60 to 102 mm in depth and from 1.2 to 15.2 m in length. On the territory of railways with a width of 1520 mm, the same data were not analyzed, but this problem is no less relevant.

The problem of transitional areas was so significant that many countries try to solve it in a variety of ways today. There are significant and sufficiently large studies of transitional areas are carried out in the US, China, Poland and other countries due to the abrupt increase of the velocity of motion.

#### Purpose

To develop a technology for strengthening the ground canvas on approaches to the bridge to prevent the emergence of bumps. To confirm the correctness of the developed technology through theoretical calculations.

#### Methodology

It is clear that the embankments and supports of the bridges differ fundamentally not only by the material they are composed of, but also by the way of their reliance on the foundation. At the same time, the temporary loads received by them are the same, which leads to a substantial difference in the character of the use of embankments and bridges.

In railway and highway bridges constructing, the bridge with the embankment is usually not arranged. Generally speaking, bridges subsidences are much smaller than the subsidences of the em-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ

bankments that connect with it. As a result, in a place of connection of the embankment and bridge, there are forming subsidences that make the entrance to the bridge more complicated. These subsidences are usually called bumps.

The consequence of the appearance of bumps may be the appearance of so-called "hanging" sleepers under which the gaps are formed, which leads to a thrust at the passage of rolling stock. Phenomenas like this are unacceptable, especially in arranging of lines of high-speed traffic [11].

Transition areas can only be considered in conjunction with bridges and embankments, which

create a whole range of impacts on these elements, as discussed in Fig. 1.

The abrupt change in the vertical stiffness of the track leads to an abrupt change in the movement of the wheel in the rolling stock, which causes uneven bending of the track [5]. This change in movement results in the vertical acceleration of the attached mass of the rolling stock, what leads to the application of additional vertical force. This mechanism is self-replicating as a dynamic load, which increases the amount of deflection each time and, consequently, the influence on the structure [13].

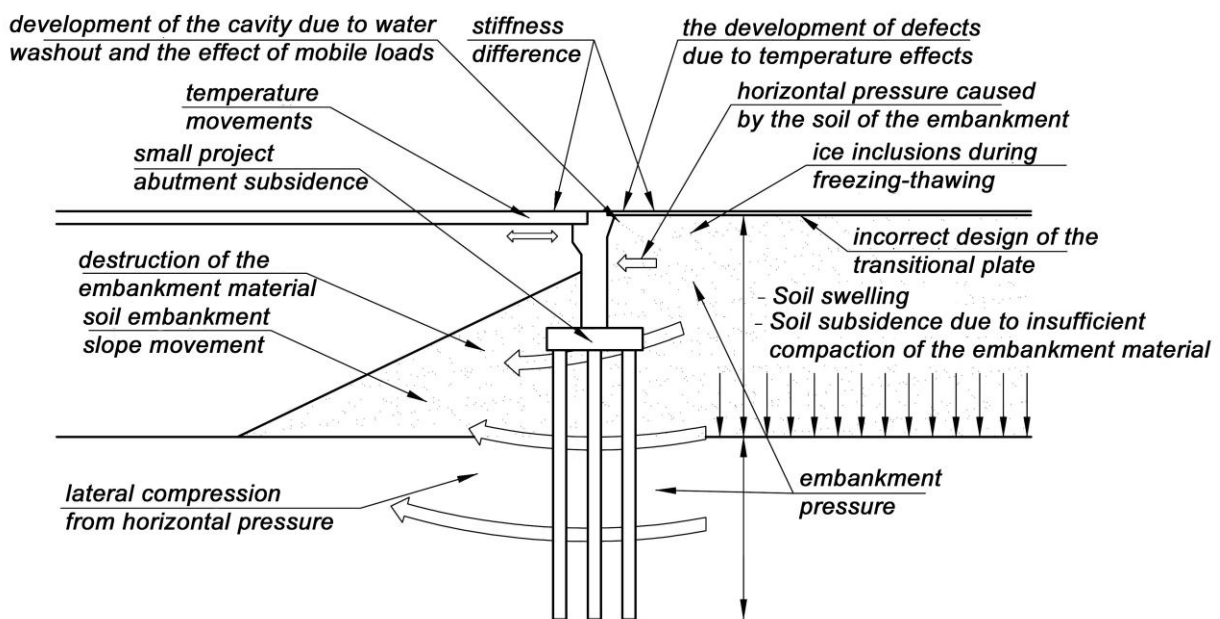


Fig. 1. Factors affecting areas with transient rigidity

This effect of increasing the load depends on the direction of movement of the train. When the train moves in the direction from the higher rigidity to the lower one, for example from the bridge to the embankment, the dynamic load is applied to the structure with less rigidity, resulting in a decrease in the velocity of subsidence. This phenomenon is characterized by the deterioration of the geometry of the track, the sprawl of the ballast prism, the general subsidence of the lower structure of the track.

In world studies of this issue there are a number of reasons that contribute to the emergence of this phenomenon, and various authors tend to different weight of various reasons. After analyzing and

summarizing the world experience, the following classification of the causes of bumps was made:

- the difference of sinking of the embankment and abutment;
- difference of the modulus of elasticity of the track in adjacent areas;
- the quality of the transient construction;
- dynamic load;
- properties of ballast material;
- condition of drainage standing;
- damping properties of adjacent structures;
- type of abutment and its construction;
- structure of linking bridge and embankment;
- characteristics of temporary loads;
- overall quality of consolidated structures.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ

Summarizing these reasons, the researchers tend to think that in the design of structures of transitional rigidity, they must gradually change the three parameters of the base:

- sinking;
- stiffness;
- damping.

If not taking into account at least one of the above-mentioned factors, the design efficiency will be low. To solve the problem of bump, there is a significant number of solutions [1, 6, 9] that can be combined into several principal lines:

- floating plate arrangement.

The arrangement of the floating plate can be reduced or divided by a larger length of subsidence of the transition of the mantle (Fig. 2). The length of the floating plate is always determined depending on the height of the mound.

Homogenization of ballast by injection of synthetic astringent materials [1]:

- the method is based on gluing the crushed stone ballast on the transition region by injecting synthetic astringent materials in it (Fig. 3);
- reinforcing the embankment of transitional parts.

Using soils with higher requirements for sediment, which fall under the scheme shown in Fig. 4.

Geogrids are laid in a layer, through every 30...50 cm, in the places of docking with the bridge - are wrapped up.

Construction of transition areas from reinforced concrete boxes filled with crushed stone.

The design consists of reinforced concrete boxes, which are bottomless boxes, whose cavities are filled with a ballast, as shown in Fig. 5.

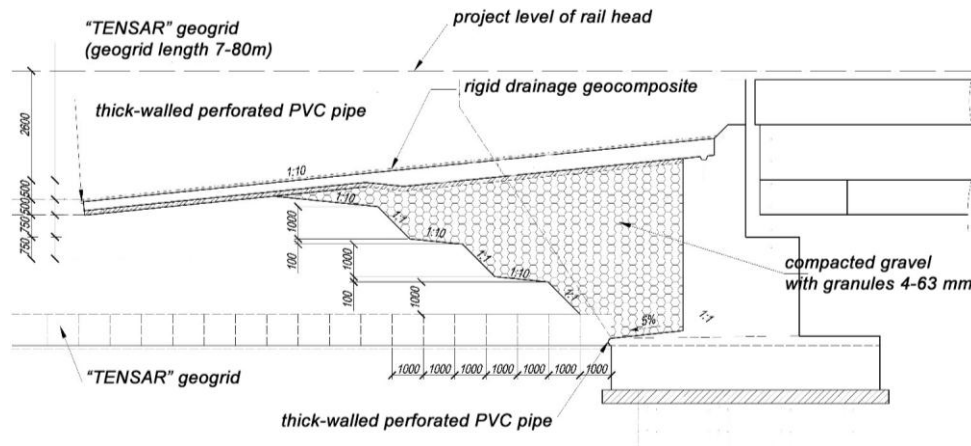


Fig. 2. Construction of a transitional area with a floating plate

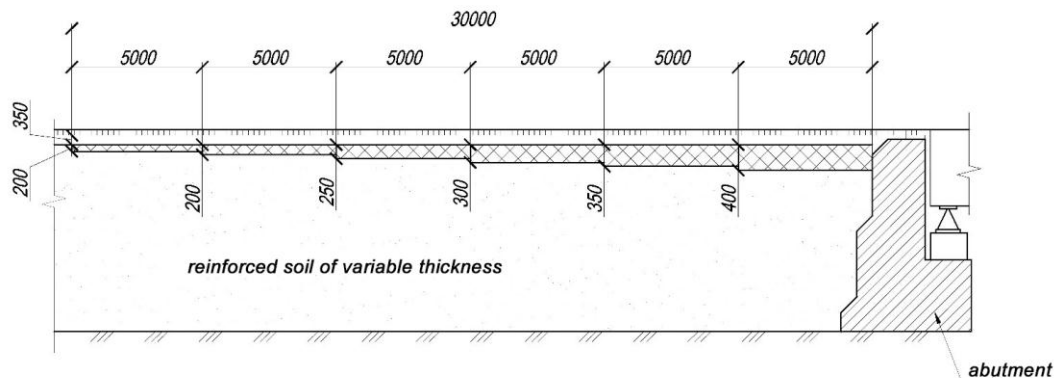


Fig. 3. Construction of the transitional area with the monolithic ballast

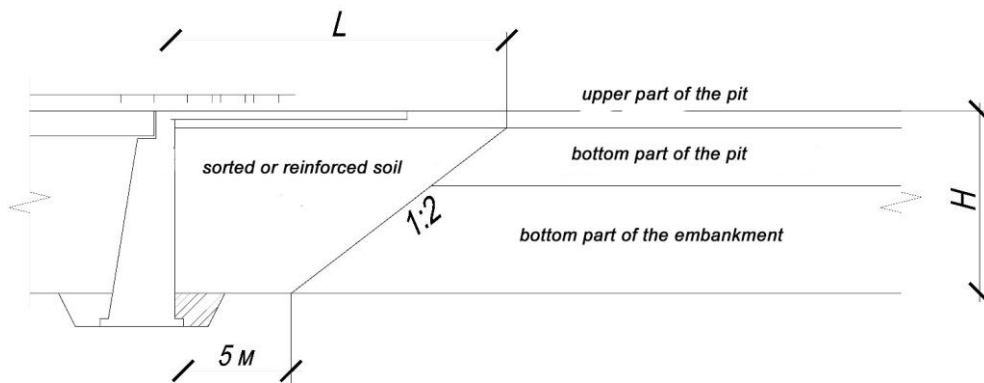


Fig. 4. Construction of the transitional area with the masonry reinforcement

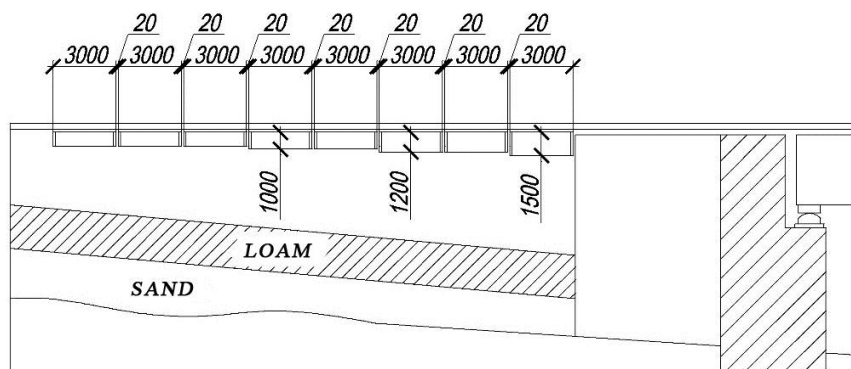


Fig. 5. Construction of the transitional area using reinforced concrete boxes

Such design significantly reduces the intensity of precipitation by prevention of ballast prism spraying due to the presence of lateral walls.

For the possibility of analyzing the data of field tests and conducting further theoretic researches on the regulation of the rigidity indexes on the approaches to the experimental bridge, which was provided by the regional branch "Pridneprovska zaliznitsa" of PJSC "Ukrzaliznytsya" for the research work, a mathematical model of the sections of the embankments on approaches to the bridge of the finite elements was calculated.

The model is based on a metal single-line railway bridge through the Bazavluk river, according to the scheme 2x55,00 m, the full length 126,60 m.

The model was built for a standing bridge and a 50-meter long bridge approach.

### Findings

The construction of the model was carried out in the program complex "Lyra-CAD" taking into

account the peculiarities of the construction of soil masses, given in [7].

To simplify the calculation, the model was constructed without taking into account slopes of the embankment, that is, almost in the form of a flat model.

The model includes: abutment on the ground-based foundation, embankment scarp in front of the abutment and the embankment behind abutment on which the load is applied [2].

The construction of the model was carried out according to the working drawings of the bridge by constructing the contour, its triangulation and protruding along the axis [8]. In this way, a mathematical model was obtained (Fig. 6).

Performing the calculation according to the norms [3,4], the deformation characteristic of the model has been obtained (Fig. 7).

To construct the model, taking into account the gain in the form of ground cement piles, we use the same initial data as for the previous one with the addition of ground cement piles in the form of rod finite elements.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ

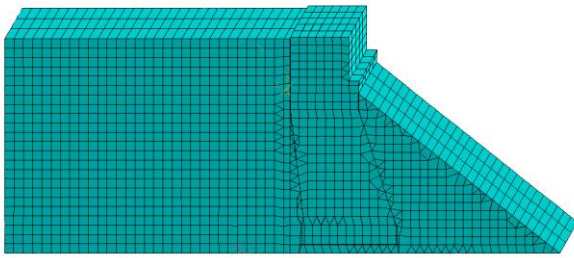


Fig. 6. Model of bulk finite elements

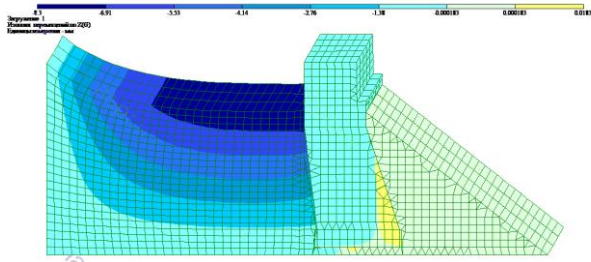


Fig. 7. Deformation of the model under load

Consequently, the model includes: abutment, surrounded by a soil array in accordance with the scheme of a bridge and piles of variable length (from 13 to 1 meter), located along the embankment behind abutment (Fig. 8).

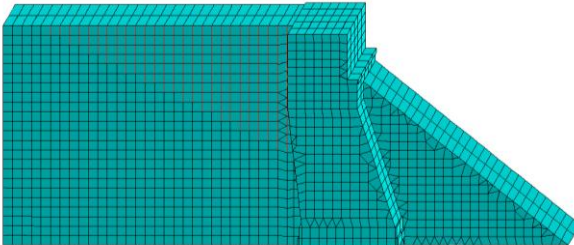


Fig. 8. The location of finite elements for modeling piles of fortifications

Performing the calculation according to the norms [3, 4], we obtain the following deformational characterization of the model (Fig. 9).

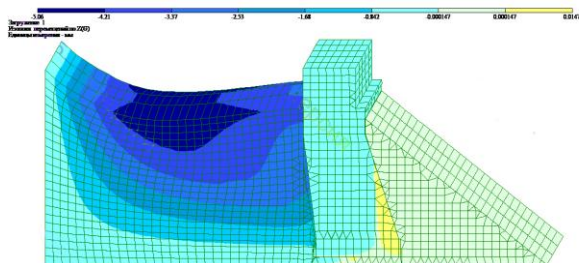


Fig. 9. Deformation of the model under load

Result of the calculation shows, that the use of ground cement piles significantly reduces soil draft loading in places of transitional rigidity from temporary load.

Experimental study of the mechanism of the work of the embankment in the road construction is possible using the method of centrifugal modeling, which allows to trace the qualitative picture of deformation, and knowledge of the general nature of deformation, which has led to the importance of correct statement of theoretical studies and to explain some phenomena occurring in nature.

The essence of the method of centrifugal modeling lies in the fact that as a field of force, such a gravitational field of centrifugal forces created when rotating a centrifugal machine is used. The model of a ground structure, made of natural material, is placed in a centrifuge, creating at its rotation a field of centrifugal forces similar to gravitational, but has a significantly higher intensity. Thus, the centrifugal modeling provides a complete preservation of the nature of the processes occurring in the design [9].

The results of practical research will be presented in the following scientific papers.

### Originality and practical value

The proposed enhancement gives the possibility to amplify the embankment in areas with a transitional rigidity index without disassembling the upper structure of the track, which is a cost-effective solution in comparison with other similar types of reinforcements.

The reinforcement of areas with a transitional rigidity indicator is now a task that ensures the uninterrupted operation of the track in approaches to bridges. This problem is becoming even more relevant with the introduction of high-speed traffic on Ukrainian railways. The described decisions help to speed up integration of Ukrainian railways into the European space.

On the basis of theoretical research, a technology was developed for the construction of areas with transitional rigidity on approaches to bridges.

### Conclusions

As a result of comparison of the data received by the theoretical and experimental model it is found out:

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ

- when modeling the existing design of the approaches, maximum deformations of 8,3 mm are obtained for the theoretical model;
- in simulation of the construction with reinforcement in the form of ground cement piles, maximum strains were obtained which made 5.06 mm for the theoretical model.

The given results allow confirming the expediency and adequacy of the proposed type of reinforcement of sites with a transitional rigidity index.

The conducted research proves the relevance of this topic. The performed calculations open new possibilities for theoretical calculation of areas with transitional rigidity. The next step of the research will be to develop and calculate new types of enhancement of the embankments.

REFERENCES

1. Вальцева, Т. Ю. Деформируемость железнодорожных насыпей на слабых основаниях, усиленных геосинтетическими материалами в условиях дальнего востока [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 20.05.2011 / Вальцева Татьяна Юрьевна, Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – Хабаровск : 2011. – 24 с.
2. Городецкий, А. С. Компьютерные модели конструкций [Текст] / А. С. Городецкий, И. Д. Евзоров. – Киев : Факт, 2008. – 394 с.
3. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи [Текст]. – Надано чинності 2009-11-11. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – С. 14-16.
4. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – Надано чинності 2006-05-06. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2006. – 233 с.
5. ДБН В.2.3-19-2008. Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування [Текст]. – Надано чинності 2008-01-26. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. – С. 29-36.
6. Дыдышко, П. И. О комплексных подходах к обеспечению к обеспечению защиты земляного полотна и верхнего строения пути в прибрежных и горных районах [Текст] / И. Дыдышко // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта – Москва : 2013. – Вып. 6. – С. 31-39.
7. Купрій, В. П., Моделювання сумісної роботи конструкції кріплення котловану та ґрунту з застосуванням методу скінчених елементів (МСЕ) [Текст] / В. П. Купрій, С. Ю. Кулаженко, А. С. Гудкова // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2015. – Вип. 7. – С. 19-26.
8. Лира 9.4<sup>®</sup> Примеры расчёта и проектирования. Учебное пособие [Текст] / В. Е. Боговис, Ю. В. Гензерский, Ю. Д. Гераймович, А. Н. Куценко, Д. В. Марченко, Д. В. Медведко, Я. Е. Слободян, В. П. Титок. – Киев : Факт, 2008 – 280 с.
9. Пьянков, С. А. Механика грунтов : учебное пособие [Текст] / С. А. Пьянков, З. К. Азизов. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 103 с.
10. Талавіра, Г. М., Відвід жорсткості підшпальної основи на ділянках перед штучними спорудами [Текст] / Г. М. Талавіра, А. В. Кудін // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2015. – Вип. 7. – С. 75-80.
11. Solomka, V. World experience of design of bridges and their operating conditions on railways with a high speed of trains [Text] / Valentina Solomka, Pavlo Ovchinnikov // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2014. – Вип. 6. – С. 147-153.
12. Weiher, H. «Verhalten von PE-HD Schutzhüllen bei der Umlenkung von verbundlosen Spanngliedern», Dissertation TU München, submitted in 2007.
13. Yau J-D, Yang Y-B, Kuo S-R. Impact response of high-speed rail bridges and riding comfort of rail cars. Eng Struct 1999; 836-44.

В. В. МАРОЧКА<sup>1</sup>, С. Г. БОБОШКО<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 83 10, эл. почта markay905@gmail.com, ORCID 0000-0001-8856-5708

<sup>2\*</sup> Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 83 10, эл. почта stepanboboshko@gmail.com, ORCID 0000-0002-7612-0696

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА УЧАСТКОВ С ПЕРЕХОДНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ЖЕСТКОСТИ НА ПОДХОДАХ К ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ МОСТАМ

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ

**Цель.** Исследовать вопрос переходной жесткости на железных дорогах Украины, сформировать комплекс существующих мероприятий по усилению переходных участков, разработать и обосновать решение проблемы переходной жесткости на подходах к железнодорожным мостам путем комбинирования разных методик. **Методика.** Для решения поставленной задачи использованы теоретические методы исследования – анализ и синтез. Для математического моделирования конструкции использован метод конечных элементов – создана трехмерная математическая модель с жесткостями, соответствующими реальным, к которой приложена статическая расчётная нагрузка подвижного состава. **Результаты.** Выполнен анализ литературных источников и опыта развитых стран мира по проблеме устройства участков с переходным показателем жесткости на подходах к железнодорожным мостам, предложено и проработано решение по устройству усиления участков с переходной жесткостью, выполнен теоретический расчет математической модели соответствующего участка, разработан рабочий проект по устройству участков с переходной жесткостью на подходах к железнодорожным мостам. **Научная новизна.** Предложена технология усиления участков с переходной жесткостью, разработана и построена модель участка с переходным показателем жесткости в первом приближении. **Практическая значимость.** Разработанная конструкция из грунтоцементных свай позволяет усиливать участки с переходным показателем жесткости на подходах к мостам без разборки верхнего строения пути. Полученные данные открывают новые возможности в экспериментальном исследовании участков с переходным показателем жесткости.

*Ключевые слова:* переходная жесткость; подходы; насыпь; устой; грунтоцемент; математическая модель

В. В. МАРОЧКА<sup>1</sup>, С. Г. БОБОШКО<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 83 10, ел. пошта markay905@gmail.com, ORCID 0000-0001-8856-5708

<sup>2\*</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 83 10, ел. пошта stepanboboshko@gmail.com, ORCID 0000-0002-7612-0696

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ УЛАШТУВАННЯ ДІЛЯНОК З ПЕРЕХІДНИМ ПОКАЗНИКОМ ЖОРСТКОСТІ НА ПІДХОДАХ ДО ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ

**Мета.** Дослідити питання перехідної жорсткості на залізницях України, сформулювати комплекс існуючих заходів щодо підсилення перехідних ділянок, розробити і обґрунтувати рішення проблеми перехідної жорсткості на підходах до залізничних мостів шляхом комбінування різних методик. **Методика.** Для вирішення поставленого завдання використані теоретичні методи дослідження - аналіз та синтез. Для математичного моделювання конструкції використаний метод кінцевих елементів - створена тривимірна математична модель з жорсткостями, що відповідають реальним, до якої прикладене статичне розрахункове навантаження рухомого складу. **Результати.** Виконаний аналіз літературних джерел і досвіду розвинених країн світу щодо проблеми пристрою ділянок з перехідним показником жорсткості на підходах до залізничних мостів, запропоновано і опрацьовано рішення по влаштуванню підсилення ділянок з перехідною жорсткістю, виконано теоретичний розрахунок математичної моделі відповідної ділянки, розроблений робочий проект по влаштуванню ділянок з перехідною жорсткістю на підходах до залізничних мостів. **Наукова новизна.** Запропоновано технологію посилення ділянок з перехідною жорсткістю, розроблена і побудована модель ділянки з перехідним показником жорсткості в першому наближенні. **Практична значимість.** Розроблена конструкція з грунтоцементних паль дозволяє підсилювати ділянки з перехідним показником жорсткості на підходах до мостів без розбирання верхньої будови колії. Отримані дані відкривають нові можливості в експериментальному дослідженні ділянок з перехідним показником жорсткості.

*Ключові слова:* перехідна жорсткість; підходи; насип; стоян; грунтоцемент; математична модель

### REFERENCES

1. Valtseva T. Yu. *Deformiruemost zheleznodorozhnyih nasyipey na slabiyh osnovaniyah, usilennyih geosinteticheskimi materialami v usloviyah dalnego vostoka. Avtoreferat Diss* [The deformability of railway

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ

- embankments on weak foundations, reinforced geosynthetic materials in the conditions of the Far East]. Habarovsk, 2011, 24 p.
2. Gorodetskiy A. S., Evzerov I. D. *Kompyuternyye modeli konstruksiy* [Computer models of constructions]. Kyjiv, Fact Publ., 2008, 394 p.
  3. *DBN V.1.2-15:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennya i vplyvy* [State Standard V.1.2-15:2009. Transport facilities. Bridges and pipes. Loads and effects]. Kyjiv. Minrehionbud Ukrainy Publ., 2009, pp. 14-16.
  4. *DBN V.2.3-14:2006. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannja* [State Standard V.2.3-14:2006. Transport constructions. Bridges and pipes. Design rules]. Kyjiv. Minrehionbud Ukrainy Publ., 2006, 233 p.
  5. *DBN V.2.3-19-2008. Sporudy transportu. Zaliznyci koliji 1520 mm. Normy proektuvannja* [State Standard C.2.3-19-2008. Transport facilities. Railway track 1520 mm. Design standards]. Kyjiv. Minrehionbud Ukrainy Publ., 2008, pp. 29-36.
  6. Dydyishko P. I. O kompleksnyh podhodah k obespecheniyu k obespecheniyu zaschity zemlyanogo polotna i verhnego stroeniya puti v pribrezhnyih i gornyh rayonah [An integrated approach to providing for the protection of the roadbed and track structure in the coastal and mountain areas]. Vestnik nauchno-issledovatelskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport]. Moscow. 2013, issue 6, pp. 31-39.
  7. Kuprii V. P., Kulazhenko Ye. Yu., Hudkova A. S. Modeliuvannia sumisnoi roboty konstruksii kriplennia kotlovanu ta gruntu z zastosuvanniam metodu skinchenykh elementiv (MSE) [Modeling collaboration mount design, excavation and soil using finite element method (FEM)]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2015, issue 6, pp. 132-137.
  8. Bogovis V. E., Genzerskiy Yu. V., Geraymovich Yu. D., Kutsenko A. N., Marchenko D. V., Medvedko D. V., Slobodyan Ya. E., Titok V. P. Lira 9.4<sup>®</sup> Primeryi raschyota i proektirovaniya. Uchebnoe posobie [Lira 9.4<sup>®</sup> Examples of calculation and design. Tutorial]. Kyjiv, Fact Publ., 2008, 280 p.
  9. Pyankov S. A., Azizov Z. K. *Mehanika gruntov: uchebnoe posobie* [Soil Mechanics: A Training Manual]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2008, 103 p.
  10. Talavira H. M., Kudin A. V. Vidvid zhorstkosti pidshpalnoi osnovy na dilianках pered shtuchnyimi sporudamy [Disqualification stiffness pidshpalnoyi bases in areas under artificial structures]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2015, issue 7, pp. 75-80.
  11. Solomka V., Ovchinnikov P. World experience of design of bridges and their operating conditions on railways with a high speed of trains. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2014, issue 6, pp. 147-153.
  12. Weiher H., «Verhalten von PE-HD Schutzhüllen bei der Umlenkung von verbundlosen Spanngliedern», Dissertation TU München, submitted in 2007.
  13. Yau J-D, Yang Y-B, Kuo S-R. Impact response of high-speed rail bridges and riding comfort of rail cars. *Eng Struct* 1999; 836-44.

*Prof. O. L. Tiutkin, D. Sc (Technical) and Prof. V. D. Petrenko, D. Sc (Technical) recommended this article to be published.*

Received: Sept. 19, 2018.

Accepted: Oct. 22, 2018.

Наукове видання

# **МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА**

**Збірник наукових праць  
Дніпропетровського національного університету  
залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

**Випуск 13**

*(українською, російською та англійською мовами)*

*Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
КВ № 17811-6661Р від 27.04.2011 р., видане Міністерством юстиції України*

*Відповідальні за випуск О. Л. Тютькін, Н. К. Петросян  
Комп'ютерне верстання В. Л. Рикіна*

*Статті в збірнику друкуються в авторській редакції*

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. др. арк. 8,11. Тираж 50 пр. Зам. № \_\_\_\_\_.

Видавництво ПП «Крос-Принт»  
49047, м. Дніпро, пров. Верстакобудівельний, 3/4  
Свідоцтво ДК №2804 від 26.03.2007 р.

Віддруковано: ФОП Удовиченко О. М. 49080, м. Дніпро,  
вул. Донецьке шосе, 15, кв. 531. Тел.: (056) 785-22-31.  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру ДК №3660 від 28.12.2009 р.



ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print). Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : Зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2016. Випуск 10. 1-125.