



МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Збірник наукових праць

Дніпровського національного університету
залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Випуск 15

2019

20947

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

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

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

За загальною редакцією проф. О. М. ПШІНЬКА

Засновано у 2011 році

Випуск 15



ВНЛ

Дніпро
2019

УДК 624.21 + 624.19(066)
ББК 39.112
Д 54

ЗАСНОВНИК ТА ВИДАВЕЦЬ:
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна від 24.06.2019 р., протокол № 13

*Внесено до Переліку наукових фахових видань України
наказом Міністерства освіти і науки України від 21.12.2015 р. № 1328 (технічні науки)*

Голова редакційної ради університету – доктор технічних наук *О. М. Пшінько*

Редакційна колегія:

головний редактор – доктор технічних наук *О. Л. Тютюкін*
відповідальний секретар – *Н. К. Петросян*

Члени редакційної колегії:

доктор фізико-математичних наук *В. М. Ахундов*,
доктори технічних наук *Ю. Л. Винников, Г. І. Гайко,*
С. М. Гапесв, Й. Й. Лучко, М. І. Нетеса, В. Д. Петренко,
А. А. Плугін, А. В. Радкевич, А. С. Саммаль, Войцех Франус,
доктор філософії *Ахмад Алхдур*

Д 54 **Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика :** Збірник наукових праць Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 15. – Дніпро, 2019. – 95 с.
ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print)

У статтях висвітлені наукові дослідження, виконані авторами у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та інших організаціях. Статті присвячені вирішенню актуальних питань із проблем розрахунків, проектування, будівництва, експлуатації та реконструкції мостів, тунелів і інших інженерних споруд, застосування сучасних будівельних матеріалів і технологій будівництва, пошуку шляхів підвищення надійності та подовження довговічності інженерних споруд.

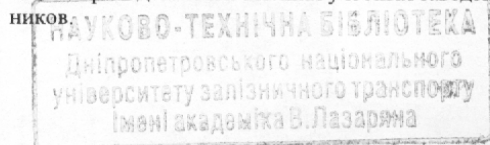
Збірник наукових праць становить інтерес для працівників експлуатаційних і науково-дослідних організацій, викладачів вищих навчальних закладів, докторантів, аспірантів, магістрантів та інженерно-технічних працівників.

The articles reflect the scientific research carried out by the authors at the Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan and other organizations. The articles are devoted to the solution of topical issues on the problems of calculations, design, construction, operation and reconstruction of bridges, tunnels and other engineering structures, the use of modern building materials and construction technologies, the search for ways to increase reliability and extend the durability of engineering structures.

The collection of scientific papers is of interest to workers of operational and research organizations, teachers of higher educational institutions, doctoral students, graduate students, undergraduates and engineering and technical workers.

В статьях отражены научные исследования, выполненные авторами в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна и других организациях. Статьи посвящены решению актуальных вопросов по проблемам расчетов, проектирования, строительства, эксплуатации и реконструкции мостов, тоннелей и прочих инженерных сооружений, применения современных строительных материалов и технологий строительства, поиску путей повышения надежности и продления долговечности инженерных сооружений.

Сборник научных трудов представляет интерес для работников эксплуатационных и научно-исследовательских организаций, преподавателей высших учебных заведений, докторантов, аспирантов, магистрантов и инженерно-технических работников.



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

© Дніпровськ. нац. ун-т залізн.
трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2019

866424 - 866425 = (28)

ЗМІСТ

Д. О. БАННИКОВ АВАРІЇ ТА ВІДМОВИ СТАЛЕВИХ ТОНКОСТІННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СИЛОСІВ ДЛЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР	6 ✓
Г. І. ГАЙКО, І. О. САВЧЕНКО, І. О. МАТВІЙЧУК ОЦІНЮВАННЯ ДІЛЯНОК БУДІВНИЦТВА ПІДЗЕМНИХ ПАРКІНГІВ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ	18
С. І. КУШНІР, О. А. БОНДАР, В. О. ПОКОЛЕНКО, І. М. ЯКИМЧУК, О. М. ХОМЕНКО ЗАСТОСУВАННЯ ВІМ-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПОТРЕБ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛУ БУДІВЕЛЬНОГО ПРОЕКТУ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ ЙОГО СЕРЕДОВИЩЕМ	26
А. І. ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО СТОХАСТИЧНА ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СПОРУДИ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ МОСТАМИ	34
Я. С. ЛЕЙБУК, О. О. СКОРИК, Н. О. МУРИГІНА, А. С. ЗВЕРЄВА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПРИВЕДЕНОЇ МАСИ КОЛІЇ	41
І. В. МЯСНИКОВ, С. М. ГАПЄЄВ, М. О. ВИГОДІН ВИПРОБУВАННЯ МІЖКРАМНИХ ОГОРОЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	47
А. М. НЕТЕСА, А. В. РАДКЕВИЧ ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ РІЗЬБОВОГО З'ЄДНАННЯ АРМАТУРИ ДЛЯ ЗБІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КАРКАСІВ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД	54
В. Д. ПЕТРЕНКО, В. И. ПЕТРЕНКО, Н. В. БЕЛОУС, АХМАД АЛХДУР ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ БУДІВНИЦТВА КОЛЕКТОРНОГО ТУНЕЛЮ В М. КИСВІ	61
О. М. ПІШНЬКО, А. С. ЩЕРБАК, О. В. ГРОМОВА, А. В. КРАСНЮК, Т. В. СТАРОСОЛЬСКА ПИТАННЯ ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИШУКУВАНЬ ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ ТА БУДІВНИЦТВА МОСТІВ	70
П. П. ТЕСЛЕНКО, О. А. БОНДАР, В. О. ПОКОЛЕНКО, І. М. ЯКИМЧУК, О. М. ХОМЕНКО ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ДЕВЕЛОПМЕНТУ МУНІЦИПАЛЬНИХ БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЕКТІВ	77
В. Д. ПЕТРЕНКО, О. Л. ТЮТЬКІН, Д. Ю. ІГНАТЕНКО АНАЛІЗ РОЗБІЖНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ КОЕФІЦІЕНТА СТІЙКОСТІ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНОГО СХИЛУ	86

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.954.014-022.326.5:633.1

Д. О. БАННИКОВ

Кафедра будівельного виробництва та геодезії, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

АВАРІЇ ТА ВІДМОВИ СТАЛЕВИХ ТОНКОСТІННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СИЛОСІВ ДЛЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Мета. Проаналізувати та узагальнити наявний ілюстративно-статистичний матеріал стосовно аварій та відмов сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованими стінками. На основі цього сформулювати рекомендації щодо усунення встановлених причин та мінімізації їх наслідків в практиці експлуатації. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведена робота зі збору, накопичення, сортування та обробки наявного ілюстративно-статистичного матеріалу щодо аварійних випадків сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованими стінками. При цьому до уваги приймалися дані як вітчизняних науковців і фахівців підприємств, так і закордонних дослідників. **Результати.** На основі наявних даних щодо аварійності сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованими стінками уточнено й доповнено класифікацію причин виникнення різноманітних аварій та відмов, а також сформульовано рекомендації щодо запобігання та усунення подібних випадків в майбутньому. Також окремо наголошено на необхідність проведення спеціальних перевірочних розрахунків у випадку встановлення в Україні сталевих силосних споруд закордонного виробництва. **Наукова новизна.** Уточнено теоретичні причини виникнення різноманітних аварійних ситуацій, характерних для України, із сталевими циліндричними тонкостінними силосами із гофрованими стінками для зберігання зернових культур. Зокрема виявлено проблему невідповідності в багатьох випадках проектних характеристик силосних конструкцій чинним нормативним документам України. **Практична значимість.** Результати проведеного аналізу з уточнення причин виникнення аварійних ситуацій зі сталевими циліндричними тонкостінними силосами із гофрованими стінками необхідно враховувати під час їх будівництва та розміщення в Україні. У разі виявлення будь-яких невідповідностей вітчизняній нормативній базі в галузі проектування та створення сталевих конструкцій необхідно вносити відповідні корективи в проектну документацію, конструкцію силосної ємності, хід робіт з монтажу та режим їх подальшої експлуатації.

Ключові слова: тонкостінний силос; аварія; відмова; сталеві конструкції

Вступ

В останні десятиріччя в Україні широкого розповсюдження набули сталеві тонкостінні циліндричні силоси, виконані по американській технології (Cao, & Zhao, 2018; Djelloul, & Mohammed, 2018; Ghali, 2014), для зберігання різноманітних видів зернових культур, переважно пшениці (рис. 1). Основна конструктивна особливість таких споруд полягає у застосуванні для стінок не гладких сталевих листів, як це традиційно прийнято у вітчизняній практиці, а тонкостінних гофрованих.

Для підвищення жорсткості такі листи нерідко об'єднуються в пакети до 5...6 штук, що дозволяє одночасно за рахунок збільшення сумарної товщини стінки досягти й потрібного

рівня несучої здатності конструкції. Так, наприклад, момент інерції в горизонтальному напрямку збільшується приблизно в 50...70 разів, а момент опору в 5...10 разів.

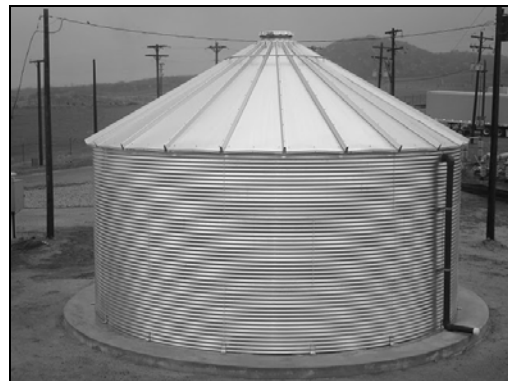


Рис. 1. Загальний вигляд сталевих тонкостінних силосів із гофрованою стінкою

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Зверху споруда накривається конусоподібною покрівлею, яка являє собою систему радіально розташованих балок, заповнених сталевими тонкостінними листами.

Діаметр силосів такої конструкції може сягати 30 м при висоті до 45 м. Тому вони є досить ефективними накопичувальними спорудами із значним об'ємом. Подібні силоси достатньо широко використовуються на різноманітних підприємствах, пов'язаних із тимчасовим складуванням та перевантаженням як сільськогосподарської продукції, так і дрібної промислової продукції. Здебільшого це транспортні вузли на зразок залізничних станцій, річкових і морських портів, тощо.

Незважаючи на вже досить значний накопичений досвід будівництва і експлуатації силосних споруд, подібної конструктивної схеми в практиці аварій та відмови їх не є рідким явищем. Автор вже висвітлював це питання в своїх попередніх роботах (Банников, 2009; Bannikov, 2011; Качуренко, & Банников, 2016). Проте з тих пір з'явився новий цікавий ілюстративно-статистичний матеріал, який дозволяє деякі аспекти даної проблеми заново проаналізувати та обговорити.

Мета

Проаналізувати та узагальнити наявний ілюстративно-статистичний матеріал стосовно аварій та відмов сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованими стінками. Формулювання рекомендацій щодо усунення встановлених причин та мінімізації їх наслідків в практиці експлуатації.

Методика

Як і в започаткованому ще в роботі Банникова і Казакевича (2002) підходу до класифікації аварій сталевих силосних споруд, будемо поділяти всі наявні дані про них на три великі групи відповідно до основних чинників, що призвели до їх появи – помилки, пов'язані із проектуванням; помилки, пов'язані із виготовленням; помилки, пов'язані із експлуатацією.

Більшість зібраного автором ілюстративно-статистичного матеріалу щодо розглядуваної проблематики аварійності сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованою стінкою, була отримана на основі співпраці із різ-

номанітними підприємствами і фахівцями. Оскільки підняте питання є досить «вузьким» з точки зору можливості і необхідності висвітлення джерел та місць подібних аварійних ситуацій, то автор намагався надавати посилання тільки в тих місцях даної публікації, де це є вкрай необхідним або погодженим із фахівцями.

До таких джерел необхідно в першу чергу віднести звіти ВАТ Укрндіпроектстальконструкція імені В. М. Шимановського про виконані під керівництвом проф. О. І. Голоднова науково-дослідні роботи (Голоднов, 2009а, 2009б, 2009с). Вони в певній мірі є базовими для України з точки зору висвітлення розглядуваної проблематики.

Із закордонних фахівців слід відмітити роботи Ковалева і Панкратової (2009) та Марковича і Панкратової (2011), в яких наведені разом із значним фактичним матеріалом, також, і критичний аналіз поданої інформації щодо відхилень між розрахунковими схемами силосних конструкцій та їх дійсною роботою.

Окремо слід відмітити ілюстративно-статистичні матеріали, отримані від фахівців Воронежського філіалу корпорації «Рейкон Холдінг» (<http://reikonholding.com>) та ДП «Зернова столиця» (<https://zeo.ua>), які також наведені в даній публікації.

Результати

Поперед всього зазначимо, що загальна тенденція, яка зараз домінує в Україні по відношенню до сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованою стінкою, полягає в наступному. Силосні споруди закупаються вже готовими відповідно до каталогів закордонних виробників, в першу чергу Туреччини або Китаю. Задача вітчизняних фахівців полягає у вірному виборі готової споруди потрібного типу під конкретні місцеві умови, а також будівництва фундаменту та, за необхідності, розвантажувальної воронкоподібної частини для такої ємності. Нерідко при цьому створюються цілі силосні комплекси, що складаються із 4...5 та більше споруд, об'єднаних єдиною системою завантаження сипучого матеріалу.

1. Помилки проектування

Основною помилкою на етапі проектування сталевих силосних споруд є невірне або некоректне визначення діючих навантажень. Світо-

ва практика (наприклад, в роботі Gaylord E., Gaylord C., & Stallmeyer, 1997) вимагає врахування цілого спектру навантажень і впливів, які на додачу можуть викликати ще й появу специфічних ефектів.

Найбільш складним і одночасно основним видом навантажень в цьому ряду є дія сипучого матеріалу. Окрім статичного тиску, вона призводить до виникнення цілого ряду специфічних ефектів, на кшталт ударних навантажень при руйнуванні склепінь або глиб консолідованого сипучого матеріалу в споруді; циклічних динамічних навантажень завдяки пульсаційному вивантаженню сипучого; нерівномірному підвищенню тиску під час вивантаження сильно сегрегованого сипучого; навантаження від вибуху пиловидної фракції сипучого.

При цьому відносно основного виду навантажень – тиску від сипучого матеріалу – наявна досить велика дослідницька база, яка на сьогодні дозволяє доволі коректно розраховувати це навантаження. Зокрема в Україні є чинним спеціальний стандарт ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2014 (2015), який регламентує саме це питання. До речі, він містить зовсім інші розрахункові моделі сипучого середовища, порівняно із також чинними нормами ДБН В.2.2-8-98 (1998). Фактично ці два документи конфліктують між собою, адже вимагають проводити розрахунки за зовсім різними передумовами та виразами.

Проте навіть невірною врахування звичайного тиску сипучого матеріалу на стінки ємності вже досить для його руйнування, наприклад під час завантаження (рис. 2). У випадку ж силосного комплексу подібне руйнування однієї споруди практично завжди тягне за собою руйнування й інших споруд (рис. 3).



Рис. 2. Аварія сталевого силосу під час завантаження зерном



Рис. 3. Руйнування силосних комплексів

Досить часто, також, трапляються випадки, коли фізико-механічні характеристики сипучого матеріалу приймають за довідковими даними. Для різних видів сільськогосподарських культур такі дані, наприклад, наведені в нормах ДБН В.2.2-8-98 (1998). Проте вони є досить усередненими. Реальні ж характеристики не визначають, що додатково вносить погрішність в розрахункові значення навантаження від тиску сипучого.

Окремою проблемою є врахування снігових і вітрових навантажень. На думку фахівців, випадки маніпуляції із величинами природно-кліматичних навантажень на силосі є досить поширеним явищем у закордонних виробників, особливо в останні роки. При цьому для підвищення продаж знижують ціну, не оговорюючи, що дана модель спроектована для більш низьких навантажень. У вітчизняній практиці подібні розрахунки не перепроверяють на відповідність чинному нормативному документу ДБН В.1.2-2:2006 (2007) або просто ігнорують. Результатом є пошкодження корпусу силосів, а то

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

й відверте падіння від вітрового навантаження (рис. 4 і 5), або деформація криши силосу від снігового навантаження (рис. 6). Особливо це характерно для порожніх споруд за несприятливих погодних умов.

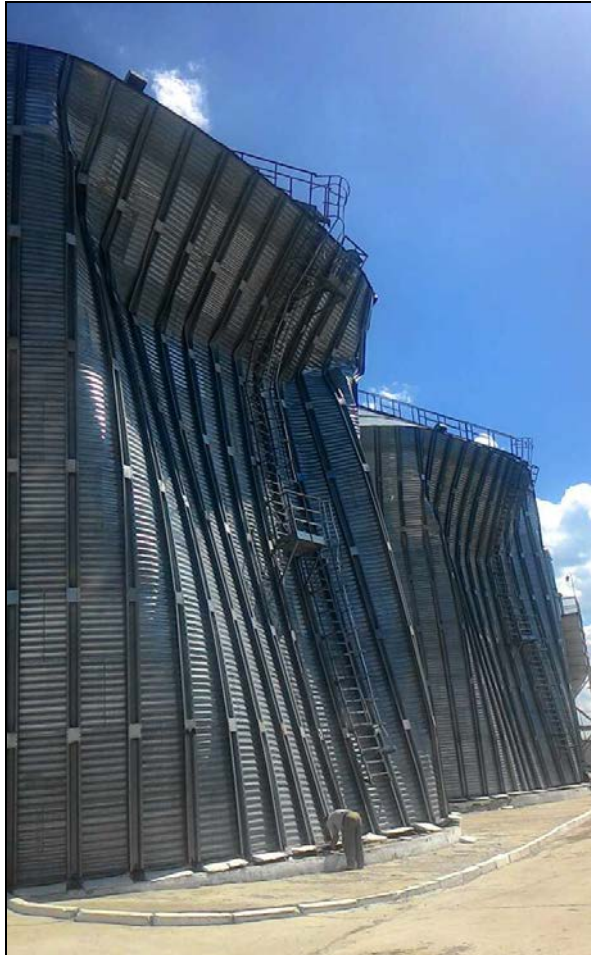


Рис. 4. Деформація корпусів силосів від вітрового навантаження

Наступним проблемним моментом при влаштуванні силосів в Україні є проектування і створення під них надійного фундаменту. При цьому, як і для будь-яких інших об'єктів, мають враховуватись не тільки фізико-механічні характеристики ґрунту в місці будівництва (пластичність, склад, рухомість, тощо), а також і рівень й агресивність ґрунтових вод по відношенню до застосованих будівельних матеріалів. Також не останню роль відіграє й можливий крен споруди від нерівномірного завантаження або особливостей ґрунтових умов. Однак саме для силосів про це чомусь часто забувають, вважаючи, що достатньо розрахувати фунда-

мент лише тільки на загальну масу завантаженого силосу, яку вважають рівномірно розподіленою. В результаті – аварія (рис. 7).



Рис. 5. Падіння силосу від вітрового навантаження



Рис. 6. Деформація криши силосу від снігового навантаження



Рис. 7. Деформація корпусу силосу внаслідок перекосу фундаменту

© Д. О. Банніков, 2019

Ще одним важливим аспектом при розробці проектно-документації є врахування відповідності самих прийнятих перерізів несучих елементів вимогам чинних нормативних документів для сталевих конструкцій ДБН В.2.6-198:2014 (2014). Особливо це пов'язано із розрахунковими довжинами та гнучкостями опорних елементів, що можуть втрачати стійкість, призводячи до падіння споруди (рис. 8).



Рис. 8. Падіння силосної споруди внаслідок втрати стійкості опорними елементами

Останнім часом все більше фахівців звертають увагу ще на одну особливість роботи сталевих силосних споруд з гофрованими стінками. Завдяки відносно невеликій товщині самих стінок, а також перерізів інших несучих конструктивних елементів, в практиці все частіше проявляється таке явище як втомне руйнування. Особливо це характерно для елементів покрівлі, яка окрім знакозмінних зусиль від природно-кліматичних навантажень, зазнає ще й постійних згінних та крутильних деформацій від утворення розрідження в споруді під час його фільтраційного витoku (рис. 9).

Проте втомні розрахунки для силосних споруд досить часто просто не виконуються, оскільки дані щодо кількості циклів розвантаження/завантаження вкрай обмежені або взагалі відсутні. До того ж частина силосних споруд використовується для тривалого зберігання зернових культур, а в рік відбувається 4...5 їх циклів роботи. Інша частина застосовується для короткочасного зберігання. Для них кількість циклів становить 4...5 на день, тому їх конструкція повинна мати вищу несучу здатність.

Відомі випадки, коли менш «потужні» силосні конструкції, орієнтовані на довготривале зберігання, намагались використовувати інтенсивніше, з усіма вихідними наслідками.



Рис. 9. Руйнування криши силосної споруди внаслідок втомних деформацій

Окреме питання пов'язано із врахуванням сейсмічних навантажень на сталеві силосні споруди. Статистика щодо такого типу аварій силосів на тепер відсутня, проте коректне врахування сейсмічних впливів для подібних просторових конструкцій є досить складною задачею, виконання якої максимально точно може бути здійснено, мабуть, лише із застосуванням чисельних розрахункових методів, на кшталт методу скінчених елементів (МСЕ). При цьому, звісно ж, необхідно використовувати й відповідні апробовані програмні продукти, які реалізують МСЕ, як наприклад, проектно-обчислювальний комплекс SCAD for Windows (Карпиловский, Криксунов, Маляренко, Фиалко, Перельмутер, А. & Перельмутер М., 2015).

Додаткову невизначеність в проектні навантаження вносить так звана, техногенна сейсмічність, яка все частіше проявляється в промислових районах. Її врахування взагалі не регламентується жодними стандартами, та й дослідження в цьому напрямку практично відсутні.

Зовсім новим явищем, з яким зіштовхнулись фахівці під час експлуатації сталевих силосних конструкцій, є утворення ожеледного шару на покрівлі. Врахування подібного виду наванта-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

жень для ємнісних конструкцій, також, не передбачено ані чинними нормами щодо визначення навантажень ДБН В.1.2-2:2006 (2007), ані будь-якими іншими будівельними стандартами України.

Немає єдності серед фахівців відносно питання щодо типу сталей, які слід застосовувати для сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованими стінками. Так, частина фахівців схиляється до думки, що замість традиційних високоміцних сталей, краще використовувати сталі звичайної міцності. На їх думку, такі сталі мають значно більш виражені пластичні якості, що певним чином при роботі ємнісної конструкції нівелює ті наявні дефекти, які можуть бути закладені в споруду на стадії її подальшого виготовлення. Щоправда застосування таких сталей збільшує масу ємності на 5...10 т і потребує зменшення кроку розташування опорних елементів, що також не завжди передбачається на стадії проектування.

2. Помилки виготовлення

Наступним етапом життєвого циклу сталевих силосних конструкцій є їх виготовлення. При цьому нерідко вноситься додаткова кількість помилок, які надалі призводять до створення аварійних ситуацій. Уникнути більшості з них, на думку фахівців, дозволяє ретельний вибір монтажних організацій, які мають в своєму штаті бригади досить кваліфікованих робітників із певним стажем роботи і потрібним обладнанням.

Критичним фактором загальної довговічності силосу є фундамент, який має виконуватися із якісного бетону, що відповідає закладеному в проектну документацію (рис. 10). Також увагу необхідно приділяти герметичності, який може призводити до виникнення зайвих турбот при подальшій експлуатації споруд у випадку його невисокої якості. Типовою помилкою при цьому є застосування герметичності для вузького діапазону температур (наприклад, від -10°C до $+10^{\circ}\text{C}$). Між тим в умовах України цей діапазон є набагато ширшим – від -36°C до $+36^{\circ}\text{C}$.

Досить розповсюдженою проблемою монтажу сталевих силосів є розташування болтів без узгодження із проектом. При цьому нерідко має місце підрізка листів обшивки споруди «за місцем», наприклад для влаштування входних люків, що зменшує відстань між отворами болтів і кромкою листа (рис. 11). На практиці це

призводить до виключення із роботи частини болтів і створення потенційно аварійної ситуації, як наприклад, розрив обшивки (рис. 12).



Рис. 10. Повторне влаштування фундаменту у зв'язку із виявленням його невідповідності проектній документації



Рис. 11. Розташування входних люків з порушенням відстаней між болтовими отворами



Рис. 12. Розрив обшивки силосної споруди в місці розташування болтових отворів

Додаткові штучні концентратори напружень утворюються при виконанні під час монтажу зайвих надрізів, внаслідок помилки робітників (рис. 13).

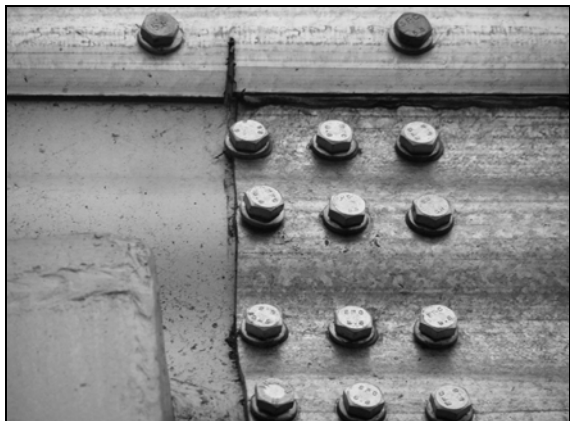


Рис. 13. Надріз несучого елемента силосної споруди в місці розташування болтових отворів

Також зустрічаються випадки, коли частина болтів в з'єднанні замінюється на болти більш низького класу (наприклад, класу 5.8 замість класу 8.8). При подальшій роботі силосної конструкції це проявляється досить чітко, коли частина болтів низької міцності «відстрілюється» від з'єднання (рис. 14).



Рис. 14. Руйнування частини низькоміцних болтів в болтовому з'єднанні

Додатково під час проведення монтажних робіт варто пам'ятати, що сталеві тонкостінні циліндричні силоси з гофрованими стінками нерідко мають значну висоту. При цьому можливим є накопичення відхилень в розмірах від проектних на досить суттєву величину. Якщо подібні відхилення мають однобічний характер, то можливо утворення так званої «елипсоїдності» на рівні верхньої грані обшивки, що при невеликих навантаженнях вже сприятиме втраті стійкості цією частиною конструкції (рис. 15).

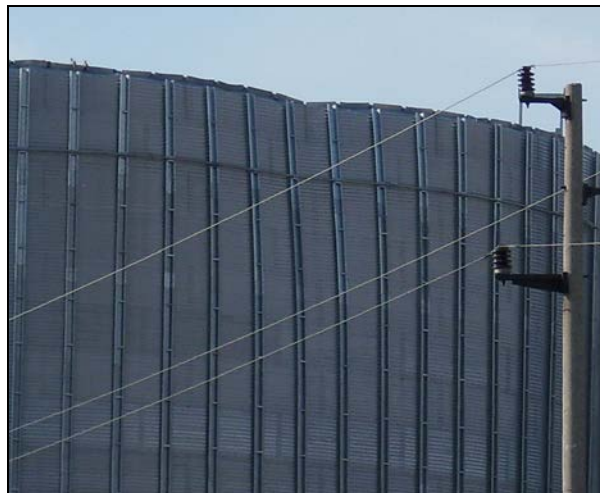


Рис. 15. Деформація корпусу силосної споруди внаслідок її «елипсоїдності»

Окремою розповсюдженою проблемою є навмисне відхилення від проекту, пов'язане із бажанням зекономити на конструкції силосу. Так зустрічаються випадки зміни перерізу несучих стійок в конструкції, що відразу ж призводить до втрати їх стійкості в цьому місці – рис. 16.

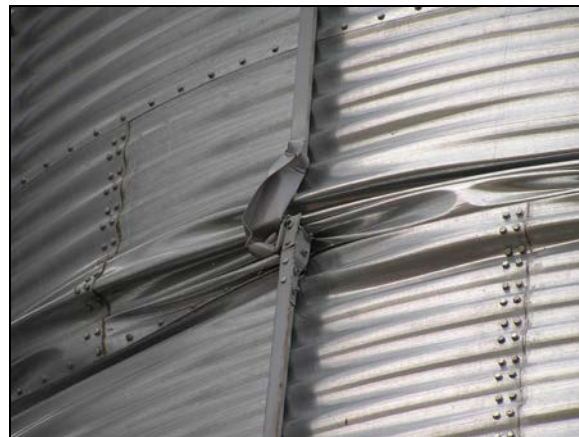


Рис. 16. Втрата місцевої стійкості стінки в місці зміни перерізу підкріплюючих стійок

3. Помилки експлуатації

На жаль, навіть грамотно спроектований і змонтований силос не завжди може пробути в роботі тривалий період часу. Причиною цього стають помилки, які допускаються під час його експлуатації. Основними з них є три наступні.

По-перше, у випадку нерівномірного завантаження, особливо через бічні завантажувальні пристрої, за їх наявності, обшивка силосної споруди також починає деформуватись нерів-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

номірно. В результаті при значних перекосах конструкція може отримати нерівномірну деформацію (рис. 17) або взагалі перекинутися.



Рис. 17. Руйнування корпусу силосної споруди внаслідок нерівномірного завантаження

По-друге, у випадку швидкого вивантаження значних обсягів зернового матеріалу, який зберігається в силосній споруді, завдяки явищу фільтраційного витоків не завжди тиск всередині ємності може швидко стабілізуватись. В результаті утворюється розрідження, яке може втягувати кришу силосу всередину конструкції (рис. 18).



Рис. 18. Втягування крихи силосної споруди внаслідок утворення розрідження повітря при розвантаженні

По третє, суттєву небезпеку являють маси зернового матеріалу, які злежуються при тривалому зберіганні. За умови несприятливого температурно-вологісного режиму починаються процеси гниття і розкладання, які також перетворюють матеріал із сипучого на глибовий. В результаті при спробі розвантажити ємність, подібні агломерати вдаряють по обшивці силосу, призводячи до серйозних руйнувань (рис. 19).



Рис. 19. Руйнування обшивки силосної споруди внаслідок удару агломерату сипучого матеріалу при розвантаженні

В теперішній час для уникнення подібних порушень в експлуатації сталевих тонкостінних циліндричних силосів розроблені спеціальні системи автоматизованого контролю за режимом їх роботи. Такі системи (рис. 20) виконують відслідковування в режимі реального часу всіх основних параметрів, в тому числі й стану зернових культур, не дозволяючи оператору виконати помилкові дії. Проте на подібних системах часто економлять, особливо в Україні.

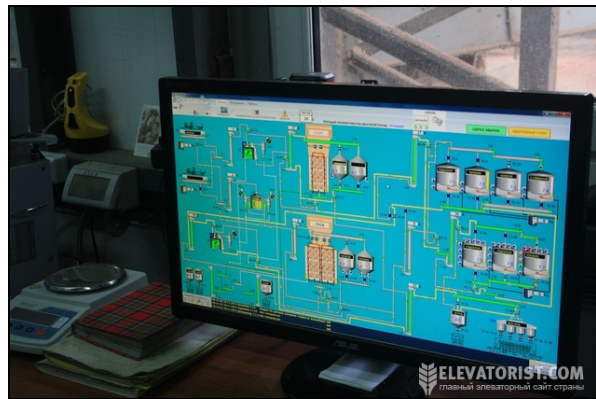


Рис. 20. Система автоматизованого керування режимом експлуатації сталевих силосних споруд для зернових культур

Підводячи підсумок, хотілося б привести одне жартівне твердження фахівців стосовно діагностування потенційного виникнення аварійної ситуації із сталевими циліндричними силосами із гофрованими стінками для зернових культур – перед аварією територія навколо споруди буде усяяна болтами. Проте доводити до цього, звісно ж, не варто.

Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, в даній публікації уточнено теоретичні причини виникнення різноманітних аварійних ситуацій, характерних для України, із сталевими циліндричними тонкостінними силосами із гофрованими стінками для зберігання зернових культур. Зокрема виявлено проблему невідповідності в багатьох випадках проектних характеристик силосних споруд чинним нормативним документам України.

Результати проведеного аналізу з уточнення причин виникнення аварійних ситуацій зі сталевими циліндричними тонкостінними силосами із гофрованими стінками необхідно враховувати під час їх будівництва та розміщення в Україні. У разі виявлення будь-яких невідповідностей вітчизняній нормативній базі в галузі проектування та створення сталевих конструкцій необхідно вносити відповідні корективи в проектну документацію, конструкцію силосної ємності, хід робіт з монтажу та режим їх подальшої експлуатації.

Висновки

На основі проведеного аналізу та виконаного узагальнення наявного ілюстративно-статистичного матеріалу стосовно аварій та відмов сталевих тонкостінних циліндричних силосів із гофрованими стінками слід сформулювати наступні рекомендації щодо усунення їх причин та мінімізації їх наслідків в практиці експлуатації:

1. Проектування силосів необхідно виконувати на доволі широкий спектр навантажень відповідно до чинних в Україні будівельних стандартів. До числа таких навантажень слід віднести навантаження від тиску сипучого матеріалу, снігові, вітрові і ожеледні навантаження, а також сейсмічні навантаження за їх наявності. Особливу увагу необхідно приділяти уточненню фізико-механічних властивостей сипучих матеріалів і режиму завантаження або вивантаження ємностей.

2. У випадку встановлення в Україні готових силосних споруд, придбаних у закордонних організацій, варто силами вітчизняних проектних установ перепроверити конструкцію на відповідність чинній в Україні нормативній базі не тільки в частині навантажень, а в частині прийнятих конструкторських рішень.

3. Виготовлення і монтаж силосних споруд необхідно виконувати тільки силами спеціалізованих організацій, які мають в своєму штаті бригади досить кваліфікованих робітників із певним стажем роботи і потрібним обладнанням.

4. Для уникнення аварійних ситуацій під час експлуатації силосних споруд необхідно встановлювати на об'єктах спеціальні автоматизовані системи контролю за режимом їх роботи.

Наприкінці публікації автор хотів би висловити свою щирю подяку д.т.н., професору, с.н.с. ВАТ Укрндіпроектстальконструкція імені В. М. Шимановського Голоднову О. І. за люб'язно надані в свій час в розпорядження автора матеріали щодо дослідження причин аварійності сталевих тонкостінних циліндричних силосів із гофрованою стінкою разом із дозволом на їх відтворення та тиражування на розсуд автора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Bannikov, D. O. (2011). Analysis of the causes of accidents of steel capacitive structures for bulk materials. *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 5, 91-96.
- Caο, Q., & Zhao, Ya. (2018). Buckling design of large eccentrically filled steel silos. *Powder Technology*, Vol. 327, 476-488. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.001>
- Djelloul, Z., & Mohammed, D. (2018). Contribution to the seismic behaviour of steel silos: full finite-element analysis versus the Eurocode approach. *Asian Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, 757-773. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0062-z>
- Gaylord, E. H. Jr., Gaylord, C. N., & Stallmeyer, J. E. (Eds.) (1997). *Structural Engineering Handbook*. McGraw-Hill.
- Ghali, A. (2014). *Circular Storage Tanks and Silos*. London: CRC Press. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1201/b16887>
- Банніков, Д. О., & Казакевич, М. И. (2002). Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов. *Металеві конструкції. Том 5, № 1*, 59-66.
- Банніков, Д. О. (2009). *Вертикальные жесткие стальные емкости: современные концепции формообразования*. Днепропетровск: Монолит.
- Голоднов, О. І. (2009а). *Дослідження причин руйнації будівельного об'єкту – силосу для зберігання сухого зерна на 5500 тонн (інв. № 9034, за технологічною схемою – ємність № 14, СМВУ*

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- 220.14В12) пункту приймання та відвантаження зерна філії «Золотоніська» ТОВ СП «НІБУЛОН», розташованої за адресою вул. Залізнична, 38 в с. Вознесенське Золотоніського р-ну Черкаської обл. Київ: ВАТ Укрндіпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського.
- Голоднов, О. І. (2009б). Дослідження причин появи пошкоджень будівельного об'єкту – силосу для оперативного зберігання зерна на 442 тонни (СМВУ 73.10.К45.В12), який розташований на території елеватору в с. Піщане Черкаської обл. Київ: ВАТ Укрндіпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського.
- Голоднов, О. І. (2009с). Дослідження причин появи пошкоджень будівельного об'єкту – силосу № 3 для зберігання сухого зерна на 5649 тонн (СМВУ 220.15.В12), який розташований на території елеватору в с. Піщане Черкаської обл. Київ: ВАТ Укрндіпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського.
- ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна. (1998). Київ: Держбуд України.
- ДБН В.1.2-2:2006 (зі змінами). Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. *Норми проектування*. (2007). Київ: Держбуд України.
- ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. *Норми проектування*. (2014). Київ: Мінрегіонбуд України.
- ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2014. *Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари (EN 1991-4:2006, IDT)*. (2015). Київ: Мінрегіонрозвитку України.
- Карпиловский, В. С., Криксунов, Э. З., Маляренко, А. А., Фиалко, С. Ю., Перельмутер, А. В., & Перельмутер М. А. (2015). *SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++*. Москва: СКАД СОФТ.
- Качуренко, В. В. & Банников Д. О. (2016). *Конструктивные решения стальных емкостей для сыпучих материалов*. Днепропетровск: Новая идеология.
- Ковалев, А. О., & Панкратова, Г. Е. (2009). *Долговечность инженерных силосных сооружений и причины их разрушения*. Москва: МГСУ.
- Маркович, А. С., & Панкратова, Г. Е. (2011). К вопросу повышения долговечности инженерных силосных сооружений. *Вестник Тамбовского государственного технического университета. Том 17, № 3, 775-779*.

Д. О. БАННИКОВ

Кафедра строительного производства и геодезии, Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

АВАРИИ И ОТКАЗЫ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СИЛОСОВ ДЛЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Цель. Проанализировать и обобщить имеющийся иллюстративно-статистический материал относительно аварий и отказов стальных цилиндрических тонкостенных силосов с гофрированными стенками. На основе этого сформулировать рекомендации по устранению установленных причин и минимизации их последствий в практике эксплуатации. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведена работа по сбору, накоплению, сортировке и обработке имеющегося иллюстративно-статистического материала относительно аварийных случаев стальных цилиндрических тонкостенных силосов с гофрированными стенками. При этом во внимание принимались данные как отечественных ученых и специалистов предприятий, так и зарубежных исследователей. **Результаты.** На основе имеющихся данных относительно аварийности стальных цилиндрических тонкостенных силосов с гофрированными стенками уточнена и дополнена классификация причин возникновения различных аварий и отказов, а также сформулированы рекомендации по предупреждению и устранению подобных случаев в будущем. Также отдельно отмечена необходимость проведения специальных проверочных расчетов в случае установки в Украине стальных силосных сооружений зарубежного производства. **Научная новизна.** Уточнены теоретические причины возникновения различных аварийных ситуаций, характерных для Украины, со стальными цилиндрическими тонкостенными силосами с гофрированными стенками для хранения зерновых культур. В частности выявлена проблема несоответствия во многих случаях проектных характеристик силосных конструкций действующим нормативным документам Украины. **Практическая значимость.** Результаты проведенного анализа по уточнению причин возникновения аварийных ситуаций со стальными цилиндрическими тонкостенными силосами с гофрированными стенками необходимо учитывать во время их строительства и размещения в Украине. В случае

© Д. О. Банніков, 2019

виявлення яких-либо несоответствий отечественной нормативной базе в сфере проектирования и создания стальных конструкций необходимо вносить соответствующие коррективы в проектную документацию, конструкцию силосной емкости, ход работ по монтажу и режим их дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: тонкостенный силос; авария; отказ; стальные конструкции

D. O. BANNIKOV

Department of Construction Production and Geodesy, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

ACCIDENTS AND FAILURES OF STEEL THIN-WALLED CILINDRIC SILOS FOR GRAIN CULTURES

Purpose. To analyze and to summarize the available illustrative and statistical material on accidents and failures of steel cylindrical thin-walled silos with corrugated walls. On the basis of this, to formulate recommendations on eliminating of the established causes and minimizing their consequences in the practice of exploitation. **Methodology.** To achieve this goal, the work was done on collecting, accumulating, sorting and processing of existing illustrative and statistical material regarding accidental cases of steel cylindrical thin-walled silos with corrugated walls. At the same time, the data of both domestic scientists and specialists of enterprises, and foreign researchers were taken into account. **Findings.** Based on the available data on the accident rate of steel cylindrical thin-walled silos with corrugated walls, the classification of the causes of various accidents and failures has been clarified and supplemented, and recommendations have been formulated for preventing and eliminating such cases in the future. The need for special verification calculations in case of installation of steel silo structures of foreign manufacture in Ukraine is noted also separately. **Originality.** The theoretical reasons for the occurrence of various accident characteristic of Ukraine with steel cylindrical thin-walled silos with corrugated walls for storage of grain crops have been clarified. In particular, the problem of absence of corresponding in many cases of the design characteristics of silo structures with the current regulatory documents of Ukraine was revealed. **Practical value.** The results of the analysis to clarify the causes of accidents with steel cylindrical thin-walled silos with corrugated walls must be considered during their construction and placement in Ukraine. In the event of any discrepancies in the domestic regulatory framework in the field of design and creation of steel structures, it is necessary to make appropriate adjustments to the design documentation, the silo capacity structure, the progress of installation and the mode of their further exploitation.

Keywords: thin-walled silos; accidents; failures; steel structures

REFERENCES

- Bannikov, D. O. (2011). Analysis of the causes of accidents of steel capacitive structures for bulk materials. *Metalurgical and Mining Industry, Vol. 5*, 91-96. (in English)
- Cao, Q., & Zhao, Ya. (2018). Buckling design of large eccentrically filled steel silos. *Powder Technology, Vol. 327*, 476-488. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.001> (in English)
- Djelloul, Z., & Mohammed, D. (2018). Contribution to the seismic behaviour of steel silos: full finite-element analysis versus the Eurocode approach. *Asian Journal of Civil Engineering, Vol. 19*, 757-773. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0062-z> (in English)
- Gaylord, E. H. Jr., Gaylord, C. N., & Stallmeyer, J. E. (Eds.) (1997). *Structural Engineering Handbook*. McGraw-Hill. (in English)
- Ghali, A. (2014). *Circular Storage Tanks and Silos*. London: CRC Press. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1201/b16887> (in English)
- Bannikov, D. O., & Kazakevich, M. I. (2002). Osnovnye prichiny avarij zhestkih stal'nyh bunkerov i nizkih silosov. *Metalevi konstruktsii. Tom 5, № 1*, 59-66. (in Russian)
- Bannikov, D. O. (2009). *Vertikal'nye zhestkie stal'nye emkosti: sovremennye koncepcii formoobrazovanija*. Dnepropetrovsk: Monolit. (in Russian)
- Holodnov, O. I. (2009a). *Doslidzhennia prychnyn ruynatsii budivelnoho ob'ektu – sylosu dlia zberihannia sukhoho zerna na 5500 tonn (inv. № 9034, za tekhnolohichnoi skhemoiu – yemnist № 14, SMVU 220.14V12) punktu pryimannia ta vidvantazhennia zerna filii «Zolotoniska» TOV SP «NIBULON», roztashovanoi za adresoii vul.*

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Zaliznychna, 38 v s. Voznesenske Zolotoniskoho r-nu Cherkaskoi obl. Kyiv: VAT Ukrndiproektstalkonstruksii im. V. M. Shymanovskoho. (in Ukrainian)

Holodnov, O. I. (2009b). *Doslidzhennia prychyn poiavy poskodzhen budivelnoho ob'ektu – sylosu dlia operatyvnoho zberihannia zerna na 442 tonny (SMVU 73.10.K45.V12), yakyi roztashovanyi na terytorii elevatoru v s. Pishchane Cherkaskoi obl.* Kyiv: VAT Ukrndiproektstalkonstruksii im. V. M. Shymanovskoho. (in Ukrainian)

Holodnov, O. I. (2009c). *Doslidzhennia prychyn poiavy poskodzhen budivelnoho ob'ektu – sylosu № 3 dlia zberihannia sukhoho zerna na 5649 ton (SMVU 220.15.V12), yakyi roztashovanyi na terytorii elevatoru v s. Pishchane Cherkaskoi obl.* Kyiv: VAT Ukrndiproektstalkonstruksii im. V. M. Shymanovskoho. (in Ukrainian)

DBN V.2.2-8-98. *Pidpriemstva, budivli ta sporudy po zberihanniu ta pererobtsi zerna. (1998).* Kyiv: Derzhbud Ukrainy. (in Ukrainian)

DBN V.1.2-2:2006 (zi zminamy). *Systema nadiinosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. (2007).* Kyiv: Derzhbud Ukrainy. (in Ukrainian)

DBN V.2.6-198:2014. *Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia. (2014).* Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)

DSTU-N B EN 1991-4:2014. *Yevrokod 1. Dii na konstruksii. Chastyna 4. Bunkery i rezervuary (EN 1991-4:2006, IDT). (2015).* Kyiv: Minrehionrozvytku Ukrainy. (in Ukrainian)

Karpilovskij, V. S., Kriksunov, Je. Z., Maljarenko, A. A., Fialko, S. Ju., Perel'muter, A. V., & Perel'muter M. A. (2015). *SCAD Office. Versija 21. Vychislitel'nyj kompleks SCAD++.* Moskva: SKAD SOFT. (in Russian)

Kachurenko, V. V. & Bannikov D. O. (2016). *Konstruktivnye reshenija stal'nyh emkostej dlja sypuchih materialov.* Dnepropetrovsk: Novaja ideologija. (in Russian)

Kovalev, A. O., & Pankratova, G. E. (2009). *Dolgovechnost' inzhenernyh silosnyh sooruzhenij i prichiny ih razrushenija.* Moskva: MGSU. (in Russian)

Markovich, A. C., & Pankratova, G. E. (2011). *K voprosu povyshenija dolgovechnosti inzhenernyh silosnyh sooruzhenij. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Tom 17, № 3, 775-779.* (in Russian)

Надійшла до редколегії 04.03.2019

Прийнята до друку 11.03.2019

Г. І. ГАЙКО^{1*}, І. О. САВЧЕНКО², І. О. МАТВІЙЧУК³

^{1*} Інститут енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», корп. 22, буд. 37, просп. Перемоги, Київ, Україна, 03056, тел. (050) 921 94 59, ел. пошта gayko.kpi@meta.ua, ORCID 0000-0001-7471-3431

² Інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», корп. 35, буд. 37, просп. Перемоги, Київ, Україна, 03056, тел. (050) 387 16 88, ел. пошта saviil.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0921-5425

³ Інститут енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», корп. 22, буд. 37, просп. Перемоги, Київ, Україна, 03056, ел. пошта matveychuk593@gmail.com, ORCID 0000-0002-3262-8762

ОЦІНЮВАННЯ ДІЛЯНОК БУДІВНИЦТВА ПІДЗЕМНИХ ПАРКІНГІВ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ

Мета. Розробка й тестування моделі, що формалізує і супроводжує процес прийняття рішення про доцільність використання території (геологічного середовища) для міського підземного будівництва. **Методика.** Модифікований метод морфологічного аналізу урбанізованих територій, метод експертних оцінок. **Результати.** Розроблена й апробована морфологічна модель та інструментарій оцінювання ділянок будівництва підземних об'єктів, розроблені морфологічні таблиці, обґрунтовані оцінки альтернативних станів і шкали експертних оцінок, побудовані матриці взаємозв'язків факторів впливу та альтернатив параметрів, з використанням розробленої моделі проведено оцінювання двох ділянок території Києва, призначених для будівництва підземних паркінгів. **Наукова новизна.** Вперше розроблено морфологічну модель територіального розвитку підземної урбаністики, яка поєднує впливи геологічного середовища та фактори структурно-функціонального характеру, проведено її тестування на реальних будівельних ділянках Києва, застосовано модифікований метод морфологічного аналізу для оцінки ризиків урбаністичного освоєння підземного простору, отримані системні характеристики міських територій, які показують ступінь сприятливості будівництву підземних паркінгів. **Практична значимість.** Оцінка перспектив підземного будівництва на передпроектній стадії, можливості управління ризиками розвитку підземної урбаністики, зменшення вірогідності проектних помилок через неврахування певних факторів або особливостей геологічного середовища та техногенних впливів, зручна форма подання інформації для прийняття управлінських рішень у вигляді таблиць, діаграм або графіків.

Ключові слова: підземна урбаністика; підземні паркінги; георесурси; геологічне середовище; міське підземне будівництво; морфологічний аналіз; морфологічна модель; параметри впливу

Вступ

Серед великого розмаїття об'єктів міської підземної урбаністики особливе значення набувають підземні паркінги, оскільки проблема автостоянок у центральній (діловій) частині мегаполісів, а також на їх периферії, де мешканці прилеглих міст і поселень у значній масі переходять на міській транспорт (здебільшого – метрополітен) – стоїть надзвичайно гостро (Гайко, 2014; Ресин, & Попков, 2013; Самедов, & Кравець, 2011). Як було показано в роботі Панкратової та Савченка (2009), для ліквідації заторів і збільшення середньої швидкості руху у великих містах важливим фактором є рівень захаарченості транспортних шляхів, які іноді

використовують для тимчасової стоянки автомобілів. З погляду на це роль підземних паркінгів ще більше зростає. Слід зазначити, що знайти вільні ділянки під паркінги на денній поверхні у середмісті мегаполісів майже неможливо, оскільки колишнє планування міст не передбачало сучасної кількості автомобілів, а будь-які «вільні» ділянки були «правдами й неправдами» використані забудовниками для зведення житлових будинків, офісних чи торговельних центрів. Саме тому рішення проблеми парковки автомобільного транспорту в середмісті й на кінцевих станціях метра має лише одну вагому перспективу – будівництво підземних паркінгів. Серед прикладів системного підходу до вирішення проблеми зазначимо майже одночасне

будівництво 41 підземного паркінгу в Парижі, причому Науково-координаційна рада з підземної урбаністики під керівництвом славнозвісного організатора освоєння підземного простору європейських міст Е. Утюджана провела складні й суперечливі дискусії, щодо місця розташування цих підземних об'єктів (Келемен, & Вайда, 1985).

Вибір ділянки для будівництва підземного паркінга може бути успішно здійснений з використанням групи методів системного аналізу, відомої як методи якісного аналізу (Згуровський, & Панкратова, 2015; Панкратова, & Малафєєва, 2014), зокрема методу морфологічного аналізу (Савченко, 2016). В роботах (Pankratova, Savchenko, Gayko, & Kravets, 2018; Панкратова, Савченко, Гайко, & Кравець, 2018) були розглянуті альтернативні ділянки для будівництва паркінгів з позицій сприятливості геологічного середовища та техногенних факторів, зокрема були враховані: рівень динамічного навантаження, показник статичного навантаження від поверхневої забудови, показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву, вплив існуючих підземних об'єктів, генетичний тип та літологічний склад ґрунтів, розрахунковий опір ґрунту, вплив водоносних горизонтів і верховодки, тип рельєфу і морфометрія, інженерно-геологічні процеси, геотехнології будівництва підземних споруд. Це важливі чинники, які значною мірою визначають вартість і ризики будівництва й експлуатації споруди. Проте задача раціонального розміщення паркінгу є більш складною, оскільки поєднує оцінку як впливів геологічного середовища, так і структурно-функціональних факторів, які будуть визначати затребуваність паркінга на тій чи іншій території та комерційну привабливість інвестицій (Рябкова, 2014; Радкевич, Аругтюнян, & Сайков, 2018).

Мета

Мета роботи полягає в розробці інструментарію, створенню та тестуванні морфологічної моделі, що формалізує і супроводжує процес прийняття рішення про доцільність використання території для будівництва підземного паркінгу з урахуванням як техногенних і геологічних, так і структурно-функціональних факторів.

Методика

В даній роботі в якості інструментарію моделювання обрано модифікований метод морфологічного аналізу (МММА) (Савченко, 2016). Цей метод добре працює в умовах ситуаційної невизначеності, притаманної багатьом задачам системного аналізу і моделювання складних систем. Метод морфологічного аналізу є гнучким і універсальним, і він чудово зарекомендував себе для моделювання задач із дуже великою кількістю можливих альтернативних конфігурацій (Duczynski, 2017; Johansen, 2018; Sae-Hyun, & Ahn, 2019). Ідея модифікованого методу полягає у формуванні множини різноманітних варіантів деякого об'єкта (системи, події, явища тощо) і врахування всіх його можливих конфігурацій одночасно шляхом залучення Байєсівського апарату ймовірностей.

Задача оцінювання ділянки щодо придатності для підземного будівництва має ряд факторів, яким притаманна невизначеність. Така невизначеність пов'язана із декількома особливостями:

1) точне оцінювання всіх факторів впливу вимагає проведення певних інженерних або геологічних робіт і детальних вимірювань, що потребує часу та ресурсів і не завжди є економічно доцільним на передпроектному етапі;

2) більшість ділянок є неоднорідними і, відповідно, мають характеристики, що змінюються у просторі.

Тому для оцінювання залучаються експерти, які можуть приймати рішення, базуючись на досвіді, інтуїції і відносно невеликій кількості наявної інформації про ділянку.

Побудова моделі в МММА має такі кроки:

1) визначення об'єктів (сутностей), яким відповідатимуть морфологічні таблиці, та зв'язків між ними;

2) побудова морфологічних таблиць (МТ) для кожного з об'єктів;

3) оцінювання залежностей між параметрами морфологічних таблиць.

Після цього модель вважається побудованою, і може бути використаною для розрахунку оцінок альтернатив параметрів конкретного об'єкта на основі введеної експертної інформації щодо цього об'єкта.

Для створення моделі щодо оцінювання ділянок будівництва підземних паркінгів була

побудована мережа морфологічних таблиць (рис. 1).

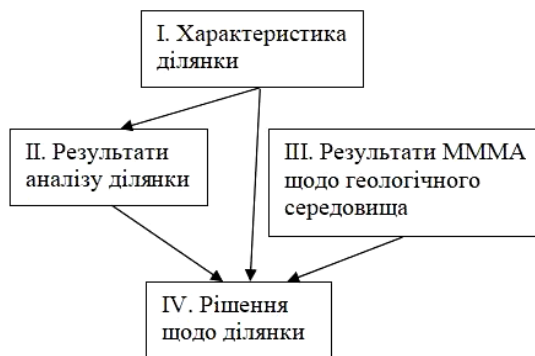


Рис. 1. Мережа морфологічних таблиць. Стрілки позначають наявність матриці зв'язків між МТ

Параметри об'єктів морфологічного аналізу були рознесені в чотири окремих таблиці. Перша таблиця «I. Характеристика ділянки» містить шість параметрів із відповідними альтернативами, що відповідають ділянці:

1. Типи урбаністичних об'єктів, що знаходяться поблизу (житлова забудова; офісні та адміністративні будівлі; торговельні та розважальні центри; стадіони, концертні зали, театри; середні та вищі навчальні заклади; архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти; промислові підприємства);

2. Кількість мешканців (до 1000; 1000...3000; 3000...6000; 6000...10000; більше 10000);

3. Кількість робочих місць (до 500; 500...1000; 1000...3000; 3000...5000; більше 5000);

4. Швидкість руху автотранспорту (висока – більше 60 км/год; середня – 30...60 км/год; низька – 15...30 км/год; дуже низька – менше 15 км/год);

5. Існуючі наземні та підземні паркомісця (до 50 п/м; 50...200 п/м; 200...400 п/м; більше 400 п/м);

6. Доступність будівельних територій (без ускладнень; невеликі ускладнення; суттєві ускладнення).

Можна побачити, що для параметрів характерні різні типи невизначеності – невизначеність за рахунок просторового (параметр 1 – на одній ділянці, як правило, знаходяться одночасно різні типи урбаністичних об'єктів в деякій пропорції) або часового (параметр 4 – швидкість руху автотранспорту змінюється в часі)

розподілення, інформаційна невизначеність (наприклад, параметри 2 і 3 – визначення точної кількості потребуватиме спеціальних досліджень, які вимагатимуть додаткових ресурсів, тому достатньо оціночних суджень).

Зазначимо, що для задачі було вирішено розглядати радіус 300 м як компроміс щодо максимальної відстані, яку людина згодна пройти від припаркованої машини.

Для таблиці було вирішено не вводити матрицю взаємозв'язків, оскільки більшість параметрів є незалежними між собою. Тому безпосередня оцінка відповідних альтернатив повинна в значній мірі відповідати дійсності і не потребувати окремого перерахунку.

Наступна таблиця «II. Результати аналізу ділянки» містить два параметри, які описують потребу в організації паркінгу – приблизну кількість необхідних паркомісць (параметр «7. Необхідність у паркомісцях», альтернативи ті ж, що і у параметра 5 у попередній таблиці), а також тип потреби в них (параметр «8. Тип потреби у паркомісцях»):

– постійна – якщо потреба в паркомісцях залишається незмінною в різний час;

– маятникова – якщо потреба в паркомісцях залежить від часу доби (наприклад, для офісних центрів або ТРЦ);

– пікова – якщо може існувати потреба прийняти разові навантаження припаркованих автомобілів (наприклад, для стадіонів, концертних залів і т.п.).

Ця таблиця пов'язана матрицею зв'язків із попередньою таблицею, і її оцінки визначаються на основі розрахунку, що використовує цю матрицю і оцінки попередньої таблиці.

Таблиця «III. Результати морфологічного аналізу щодо геологічного середовища» містить параметри, взяті з оцінювання геологічного середовища, проведеного за процедурою, описаною в (Савченко, 2016). З таблиці результатів оцінювання взяті тільки ті, які безпосередньо впливають на рішення щодо будівництва паркінгу: параметри «А. Придатність ділянки», «В. Масштаб об'єкта», «С. Глибина забудови», які в мережі МТ з рис. 1 отримали номери відповідно 9...11. Вхідними даними для цієї таблиці є результати проведеного аналізу геологічного середовища.

Таблиця «IV. Рішення щодо ділянки» містить параметри, які описують рішення, яке до-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

цільно прийняти щодо розглядуваної ділянки – ваги придатності або непридатності ділянки для будівництва паркінгу (параметр «А. Доцільність будівництва паркінгу»), і найбільш доцільний розмір паркінгу, враховуючи як потребу у паркомісцях, так і оцінені параметри геологічного середовища (параметр «В. Доцільний розмір паркінгу»).

Таблиця IV пов'язана матрицею зв'язків із всіма попередніми таблицями. Матриці зв'язків заповнені на основі експертного опитування. Таким чином отримана модель для оцінювання доцільності будівництва паркінгу.

Результати

Для тестування розробленої моделі були

взяті ті ж дві ділянки, що і в дослідженні (Панкратова, Савченко, Гайко, & Кравець, 2018):

– ділянка 1 – у Шевченківському районі на Проспекті Перемоги;

– ділянка 2 – у Шевченківському районі між вулицями Бульварно-Кудрявська та Гончара.

Оцінювання ділянок здійснювалось шляхом експертного опитування, де експерту пропонувалось оцінити відповідність кожної альтернативи кожного параметра МТ «І. Характеристика ділянки» обом ділянкам, і в результаті отримані такі вхідні дані (табл. 1). Для кожного параметра ваги альтернатив були пронормовані, щоб сума ваг дорівнювала одиниці.

Таблиця 1

Вхідні дані щодо характеристик ділянок

Параметр	Альтернатива	Ненормовані значення		Нормовані значення	
		Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 1	Ділянка 2
1	1.1 Житлова забудова	0,8	0,8	0,242	0,184
	1.2 Офісні та адміністративні будівлі	0,8	0,8	0,242	0,184
	1.3 Торгівельні та розважальні центри	0,65	0,8	0,197	0,184
	1.4 Стадіони, концертні зали, театри	0,65	0,65	0,197	0,149
	1.5 Середні та вищі навчальні заклади	0,2	0,65	0,061	0,149
	1.6 Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти	0	0,65	0,000	0,149
	1.7 Промислові підприємства	0,2	0	0,061	0,000
2	2.1 До 1000	0	0,2	0,000	0,091
	2.2 1000...3000	0,35	0,65	0,206	0,295
	2.3 3000...6000	0,8	0,8	0,471	0,364
	2.4 6000...10000	0,35	0,35	0,206	0,159
	2.5 Більше 10000	0,2	0,2	0,118	0,091
3	3.1 До 500	0,35	0,2	0,175	0,100
	3.2 500...1000	0,8	0,65	0,400	0,325
	3.3 1000...3000	0,65	0,8	0,325	0,400
	3.4 3000...5000	0,2	0,35	0,100	0,175
	3.5 Більше 5000	0	0	0,000	0,000
4	4.1 Висока (більше 60 км/год)	0,35	0,35	0,206	0,163
	4.2 Середня (30...60 км/год)	0,8	0,65	0,471	0,302
	4.3 Низька (15...30 км/год)	0,35	0,8	0,206	0,372
	4.4 Дуже низька (менше 15 км/год)	0,2	0,35	0,118	0,163

Закінчення таблиці 1

5	5.1 До 50 п/м	0,8	0,8	0,593	0,400
	5.2 50...200 п/м	0,35	0,65	0,259	0,325
	5.3 200...400 п/м	0,2	0,35	0,148	0,175
	5.4 Більше 400 п/м	0	0,2	0,000	0,100
6	6.1 Без ускладнень	0,8	0,65	0,485	0,361
	6.2 Невеликі ускладнення	0,65	0,8	0,394	0,444
	6.3 Суттєві ускладнення	0,2	0,35	0,121	0,194

На першому етапі розрахунку був врахований зв'язок між МТ «І. Характеристика ділянки» і «ІІ. Результати аналізу ділянки», що на основі вхідних даних з табл. 1 дало такі результати щодо потенційної потреби ділянок у паркомісцях (табл. 2).

Таблиця 2

Результати аналізу ділянок з точки зору потреби в паркомісцях

Пар.	Альтернатива	Ділянка 1	Ділянка 2
7	7.1. До 50 п/м	0,306	0,379
	7.2. 50...200 п/м	0,407	0,390
	7.3. 200...400 п/м	0,206	0,179
	7.4. Більше 400 п/м	0,080	0,053
8	8.1. Постійна	0,272	0,275
	8.2. Маятникова	0,375	0,372
	8.3. Пікова	0,352	0,354

Як бачимо, розподіл типів потреби для обох ділянок досить близький, але для першої ділянки потреба у паркомісцях зміщена в сторону більших значень порівняно із другою ділянкою.

Далі, беручи в якості вхідних даних табл. 1, 2, а також результати оцінювання геологічного середовища з (Панкратова, Савченко, Гайко, & Кравець, 2018), були оцінені альтернативи параметрів рішень щодо ділянок (табл. 3).

Із отриманих результатів можна зробити ряд висновків. Обидві ділянки вельми сприятливі для будівництва підземних паркінгів, що видно із оцінок альтернатив параметра «А. Доцільність будівництва паркінгу». Це зумовлено розміщенням обох ділянок у місцях високої функціональної активності міського життя, у безпосередній близькості від офісних і адміністративних будівель, торгівельних і розважальних об'єктів, навчальних закладів тощо.

© Г. І. Гайко, І. О. Савченко, І. О. Матвійчук, 2019

Таблиця 3

Результати оцінювання альтернатив рішень щодо ділянок

Пар.	Альтернатива	Ділянка 1	Ділянка 2
А	А.1. Будівництво доцільне	0,853	0,979
	А.2. Будівництво недоцільне	0,147	0,021
В	В.1. До 50 п/м	0,429	0,355
	В.2. 50...200 п/м	0,444	0,456
	В.3. 200...400 п/м	0,121	0,160
	В.4. Більше 400 п/м	0,007	0,028

Проте друга з розглянутих ділянок виявилась більш сприятливою, що значною мірою пояснюється кращими показниками її геологічного середовища, розрахованими в роботі (Панкратова, Савченко, Гайко, & Кравець, 2018). Найбільш доцільним розмірами потенційних паркінгів виявились альтернативи «50–200 паркомісць» (оцінки 0,444 і 0,456 відповідно). Високі оцінки відносно невеликих паркінгів можна пояснити як кількісними показниками структурно-функціональних факторів для розглянутих районів (обмежених радіусом 300 м навколо паркінга), так і тим, що в оцінці геологічного середовища ваги доцільного масштабу (розмірів) підземного об'єкту зміщені в сторону відносно невеликих площ споруд, що сприяє їх більшій стійкості (хоча ступінь впливу цього фактору може змінюватися в залежності від обраного типу паркінга).

Наукова новизна та практична значимість

Розроблені методика та інструментарій вперше дозволили поєднати оцінку впливів і зв'язків факторів геологічного, техногенного та структурно-функціонального типів для аналізу

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

сприятливості міських територій будівництву підземних паркінгів (як з врахуванням економічних факторів будівництва, так і ризиків щодо затребуваності паркінга).

Висновки

Основою інструментарію обрано модифікований метод морфологічного аналізу, який добре зарекомендував себе у моделюванні проблемних ситуацій, об'єкти яких можуть мати велику кількість альтернативних конфігурацій за рахунок комбінування різних значень параметрів. Він дозволив, спираючись на виділені групи геологічних і техногенних факторів, а також функціональних характеристик ділянок розглянути низку рішень і груп ризиків для оцінки доцільності розвитку підземної урбаністики на розглянутих територіях. Застосована методика дозволяє оцінити різноманітні ризики, імовірність реалізації негативних сценаріїв та додаткові витрати з ними пов'язані ще на передпроектній стадії спорудження підземних об'єктів. Це дає в руки інвесторів та міських державних адміністрацій ефективний інструмент управління ризиками та інвестиціями при освоєнні підземного простору мегаполісів. Розроблена методика та інструментарій можуть бути використані для побудови стратегічних майстерпланів розвитку великих міст.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Duczynski, G. (2017). Morphological analysis as an aid to organisational design and transformation. *Futures*, 86, Elsevier.
- Johansen, I. (2018). Scenario Modelling with Morphological Analysis, in Ritchey, T., & Arciszewski, T. (Eds.) (2018). *General Morphological Analysis: Modelling, Forecasting, Innovation. Special Issue of Technological Forecasting and Social Change*, 126, Elsevier.
- Pankratova, N., Savchenko, I., Gayko, G., & Kravets, V. (2018). Evaluating Perspectives of Urban Underground Construction Using Modified Morphological Analysis Method. *Journal of*

- Automation and Information Sciences*, 50(10), 34-46.
- Sae-Hyun Ji, & Ahn, J. (2019). Scenario-Planning Method for Cost Estimation Using Morphological Analysis. *Advances in Civil Engineering*, 2019(4), 1-10.
- Savchenko, I. (2016). Estimating the Solution Sensitivity in Application of the Modified Morphological Analysis Method. *Cybernetics and Systems Analysis*, 52(5), 782-790.
- Гайко, Г. (2014). Проблеми системного планування підземного простору великих міст. *Вісник НТУУ «КПІ», серія «Гірництво»*, 25, 35-40.
- Згуровский, М., & Панкратова, Н. (2015). *Системный анализ: проблемы, методология, приложения* (друге видання). Київ: Наукова думка.
- Келемен, Я., & Вайда, З. (1985). *Город под землей*. Москва: Стройиздат.
- Панкратова, Н., & Малафеева, Л. (2014). Информационная модель знаний сценарного анализа. *Проблемы управления и информатики*, 1, 119-128.
- Панкратова, Н., & Савченко, І. (2009). Стратегія застосування методу морфологічного аналізу в процесі технологічного передбачення. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, 2, 35-44.
- Панкратова, Н., Савченко, І., Гайко, Г., & Кравець, В. (2018). Системний підхід до освоєння підземного простору мегаполісів в умовах невизначеностей та багатофакторних ризиків. *Доповіді Національної академії наук України*, 10, 18-25.
- Радкевич, А., Арутюнян, І., & Сайков, Д. (2018). Аналіз концепції формування рівня конкурентоспроможності підрядних підприємств України в умовах динамічних трансформацій вітчизняного будівельного ринку послуг. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 14, 37-45.
- Ресин, В., & Попков, Ю. (2013). *Развитие больших городов в условиях переходной экономики. Системный подход*. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ».
- Рябкова, Е. (2014). *Проектирование многоэтажных гаражей и автостоянок*. Хабаровск: Издательство ТОГУ.
- Самедов, А., & Кравець, В. (2011). *Будівництво міських підземних споруд*. Київ: НТУУ «КПІ».

Г. І. ГАЙКО^{1*}, І. А. САВЧЕНКО², І. А. МАТВЕЙЧУК³

^{1*} Інститут енергосбереження і енергоменеджмента Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського», корп. 22, д. 37, просп. Перемоги, Київ, Україна, 03056, тел. (050) 921 94 59, ел. пошта gayko.kpi@meta.ua, ORCID 0000-0001-7471-3431

² Інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського», корп. 35, д. 37, просп. Перемоги, Київ, Україна, 03056,

тел. (050) 387 16 88, ел. пошта savil.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0921-5425

³ Інститут енергосбереження і енергоменеджмента Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», корп. 22, д. 37, просп. Перемоги, Київ, Україна, 03056, ел. пошта matveychuk593@gmail.com, ORCID 0000-0002-3262-8762

ОЦЕНИВАНИЕ УЧАСТКОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ ПАРКИНГОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Цель. Разработка и тестирование модели, формализующей и сопровождающей процесс принятия решения о целесообразности использования территории (геологической среды) для городского подземного строительства. **Методика.** Модифицированный метод морфологического анализа урбанизированных территорий, метод экспертных оценок. **Результаты.** Разработана и апробирована морфологическая модель и инструментарий оценивания участков строительства подземных объектов, разработаны морфологические таблицы, обоснованы оценки альтернативных состояний и шкалы экспертных оценок, построены матрицы взаимосвязей факторов влияния и альтернатив параметров, с использованием разработанной модели проведено оценивание двух участков территории Киева, предназначенных для строительства подземных паркингов. **Научная новизна.** Впервые разработана морфологическая модель территориального развития подземной урбанистики, которая учитывает как влияние геологической среды, так и факторы структурно-функционального характера, проведено ее тестирование на реальных строительных участках Киева, применен модифицированный метод морфологического анализа для оценки рисков урбанистического освоения подземного пространства, получены системные характеристики городских территорий, которые показывают степень благоприятности строительства подземных паркингов. **Практическая значимость.** Оценивание перспектив подземного строительства на предпроектной стадии, возможности управления рисками развития подземной урбанистики, уменьшение вероятности проектных ошибок из-за неучета определенных факторов или особенностей геологической среды и техногенных воздействий, удобная форма представления информации для принятия управленческих решений в виде таблиц, диаграмм или графиков.

Ключевые слова: подземная урбанистика; подземные паркинги; георесурсы; геологическая среда; городское подземное строительство; морфологический анализ; морфологическая модель; параметры влияния

Н. І. НАЙКО^{1*}, І. О. САВЧЕНКО², І. О. МАТВІЙЧУК³

^{1*} Institute of Energy Saving and Energy Management, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Bd. 37, prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. (050) 921 94 59, e-mail gayko.kpi@meta.ua, ORCID 0000-0001-7471-3431

² Institute for Applied System Analysis, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Bd. 37, prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. (050) 387 16 88, e-mail savil.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0921-5425

³ Institute of Energy Saving and Energy Management, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Bd. 37, prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail matveychuk593@gmail.com, ORCID 0000-0002-3262-8762

EVALUATING CONSTRUCTION SITES FOR UNDERGROUND PARKING LOTS USING MODIFIED MORPHOLOGICAL ANALYSIS METHOD

Purpose. Development and testing of a model that formalizes and supports decision-making process regarding the appropriateness of using territory (geological environment) for urban underground construction. **Methodology.** Modified morphological analysis of urbanized territories, expert evaluation method. **Findings.** A morphological model as a tool set for evaluating construction sites for underground construction was tested; the morphological tables were constructed; the expert estimate scales for alternative values of construction site parameters were justified; the cross-consistency matrices of influence factors and parameter alternatives were evaluated; evaluation of two sites in Kyiv for construction of underground parking lots was performed using the developed model. **Originality.** For the first time a morphological model of territorial development for underground city planning that combines the

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

influence of structural and functional factors with impact of geological environment, was designed and tested on real construction sites in Kyiv; the modified morphological analysis method was applied for risk estimation of urban development of underground space; systemic characteristics of urban territories were obtained, which show the favorability of a site for underground construction of a parking lot. **Practical value.** Evaluating the prospect of underground construction on the pre-project stage, capabilities for risk management of urban underground city space development, diminishing the potential for project flaws caused by neglecting certain factors or specifics of a geological environment and technogenic impacts, convenient form of information generation as tables, charts or graphs.

Keywords: underground city space; georesources; geological environment; underground city construction; morphological analysis; morphological model; influence factors

REFERENCES

- Duczynski, G. (2017). Morphological analysis as an aid to organisational design and transformation. *Futures*, 86, Elsevier. (in English)
- Johansen, I. (2018). Scenario Modelling with Morphological Analysis, in Ritchey, T. & Arciszewski, T. (Eds.) (2018). *General Morphological Analysis: Modelling, Forecasting, Innovation*. Special Issue of *Technological Forecasting and Social Change*, 126, Elsevier. (in English)
- Pankratova, N., Savchenko, I., Gayko, G., & Kravets, V. (2018). Evaluating Perspectives of Urban Underground Construction Using Modified Morphological Analysis Method. *Journal of Automation and Information Sciences*, 50(10), 34-46. (in English)
- Sae-Hyun Ji, & Ahn, J. (2019). Scenario-Planning Method for Cost Estimation Using Morphological Analysis. *Advances in Civil Engineering*, 2019(4), 1-10. (in English)
- Savchenko, I. (2016). Estimating the Solution Sensitivity in Application of the Modified Morphological Analysis Method. *Cybernetics and Systems Analysis*, 52(5), 782-790. (in English)
- Haiko, H. (2014). Problemy systemnoho planuvannya pidzemnoho prostoru velykykh mist. *Visnyk NTUU «KPI», serii «Hirnyctvo»*, 25, 35-40. (in Ukrainian)
- Zgurovskij, M., & Pankratova, N. (2015). *Sistemnyj analiz: problemy, metodologija, prilozhenija* (druhe vydannia). Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
- Kelemen, Ja., & Vajda, Z. (1985). *Gorod pod zemlej*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Pankratova, N., & Malafeeva, L. (2014). Informacionnaja model' znaniy scenarnogo analiza. *Problemy upravlenija i informatiki*, 1, 119-128. (in Russian)
- Pankratova, N., & Savchenko, I. (2009). Stratehiia zastosuvannia metodu morfolohichnoho analizu v protsesi tekhnolohichnoho peredbachennia. *Naukovi visti NTUU «KPI»*, 2, 35-44. (in Ukrainian)
- Pankratova, N., Savchenko, I., Haiko, H., & Kravets, V. (2018). Systemnyi pidkhid do osvoiennia pidzemnoho prostoru mehapolisiv v umovakh nevyznachenosti ta bahatofaktornykh ryzykiv. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, 10, 18-25. (in Ukrainian)
- Radkevych, A., Arutiunian, I., & Saikov, D. (2018). Analiz kontseptsii formuvannia rivnia konkurentospromozhnosti pidriadnykh pidprijemstv Ukrainy v umovakh dynamichnykh transformatsii vitchyznianoho budivelnoho rynku posluh. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 14, 37-45. (in Ukrainian)
- Resin, V., & Popkov, Ju. (2013). *Razvitie bol'shih gorodov v uslovijah perehodnoj jekonomiki. Sistemnyj podhod*. Moskva: Knizhnyj dom «LIBROKOM». (in Russian)
- Rjabkova, E. (2014). *Proektirovanie mnogojetazhnyh garazhej i avtostojanok*. Habarovsk: Izdatel'stvo TOGU. (in Russian)
- Samedov, A., & Kravets, V. (2011). *Budivnytstvo miskykh pidzemnykh sporud*. Kyiv: NTUU «KPI». (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 22.04.2019

Прийнята до друку 30.04.2019

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 658.5:[69.05:725]

С. І. КУШНІР^{1*}, О. А. БОНДАР²,
В. О. ПОКОЛЕНКО³, І. М. ЯКИМЧУК⁴, О. М. ХОМЕНКО⁵

^{1*} Кафедра менеджменту в будівництві, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, ел. пошта nkc_kiev@ukr.net

² Кафедра менеджменту в будівництві, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, ел. пошта alenka_bon@i.ua, ORCID 0000-0002-4633-6859

³ Кафедра менеджменту в будівництві, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, ел. пошта nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0003-1750-5964

⁴ Кафедра менеджменту в будівництві, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, ел. пошта nkc_kiev@ukr.net

⁵ Кафедра менеджменту в будівництві, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, ел. пошта nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0002-6242-4736

ЗАСТОСУВАННЯ BIM-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПОТРЕБ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛУ БУДІВЕЛЬНОГО ПРОЕКТУ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ ЙОГО СЕРЕДОВИЩЕМ

Мета. Розробка на ґрунті BIM-технологій розрахунково-методичного інструментарію організаційно-технологічного моделювання та вибору варіантів організації будівництва та формалізованого адміністрування циклу будівельного девелоперського проекту. **Методика.** Застосовано основи прикладного інструментарію організації будівництва в складі життєвого циклу будівельних проектів, що ґрунтуються на залученні BIM-моделей для потреб підготовки та адміністрування таких проектів у форматі сучасного девелопменту. **Результати.** Визначено, що в сучасних реаліях вітчизняного будівельного девелопменту доцільним є узгодження системи девелопменту в будівництві з вимогами і стандартами, визначеними Project Management Institute. Виконано адаптацію існуючих моделей організації будівництва до формату та змісту BIM-технологій, які забезпечують продуктивну візуалізацію та аналіз циклу будівельного девелоперського проекту. Для потреб успішного впровадження будівельних проектів у форматі девелопменту розроблено і обґрунтовано методико-прикладний інструментарій BIM-моделювання та адміністрування будівництва. **Наукова новизна.** Визначається оригінальністю результатів проведеного дослідження та їх внеску у розвиток організаційного та технологічного моделювання як складової науки «Організація будівництва» та системністю застосування для потреб девелоперського управління. **Практична значимість.** Здійснене вдосконалення змісту аналітичного конструктивного організаційно-технологічного моделювання та адміністрування будівництва є важливим практичним інструментом успішного девелопменту в будівництві, що дозволяє реалізувати передові організаційно-управлінські та інформаційні технології для потреб девелопменту будівельних проектів.

Ключові слова: організація будівництва; будівельний девелоперський проект (БДП); BIM-інструментарій організаційно-технологічного моделювання та адміністрування циклу БДП; організаційно-технологічна модель будівництва

Вступ

У реаліях вітчизняного будівельного ринку та систем адміністрування будівництвом BIM-технології (Building Information Modeling) (Талапов, 2015; Талапов, 2017) залишаються допоміжним засобом візуально-графічного та аналітичного подання змісту будівельного девелоперського проекту як об'єкту будівництва та інвестування. Проте стратегічною тенденці-

єю даного ринку є становлення будівельного девелопменту як єдиного середовища будівельного проекту та формату адміністрування будівництвом (Бондар, & Кочедикова, 2015; Котляров, 2018).

Враховуючи такі стратегічні домінанти, виникає потреба переспрямування та переналаштування функціонального змісту та графоаналітичної конструкції BIM-технологій до особливостей підготовки та організації циклу будіве-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

льного девелоперського проекту (БДП) – від просування початкової інвестиційно-продуктової ідеї до завершення дії девелоперського контракту.

ВІМ-технології вже не слід розглядати виключно як додатковий інструмент візуалізації ходу проектного циклу (Eastman, Tieholz, Sacks, & Liston, 2011; Bradley, Lark, & Dunn, 2016; Kensek, & Noble, 2014). Їх слід позиціонувати та використовувати в більш широкому форматі, як комплексний інструмент (Кушнір, 2014; Кушнір, 2017), спрямований на вирішення завдань формалізованої оцінки та вибору загальної організаційно-технологічної моделі циклу БДП з використанням нової системи критеріїв, які охоплюють впливи як зовнішнього, так і внутрішнього мікросередовищ проекту, а також оперативного функціонально-технічного, технологічного та адміністративного контролю виконання окремих стадій і робіт БДП субпідрядниками (виконавцями) проекту.

Потреба залучення ВІМ-технологій до складу організаційно-технологічних моделей будівництва як чинника їх аналітичного оновлення визначає актуальність дослідження, представленого в даній статті.

Мета

Метою є розробка на ґрунті ВІМ-технологій розрахунково-методичного інструментарію організаційно-технологічного моделювання та вибору варіантів організації будівництва та формалізованого адміністрування циклу будівельного девелоперського проекту – від ініціювання до створення готової будівельної продукції. Об'єктом дослідження є процеси організації будівництва в складі життєвого циклу будівельного девелоперського проекту, а предметом дослідження – є методичні засади та інструментарій оновлення моделей та оргструктур девелоперського управління будівництвом на ґрунті ВІМ-технологій.

Методика

За підсумком аналізу джерел виявлено, що важливим чинником в подоланні інерції щодо впровадження девелопменту в будівництві слід вважати розробку нових інструментів моделювання будівництва, які б відображали нові підходи в організації будівництва за схемою девелоперського управління. Для цього слід залучати переваги моделей-аналогів, що зарекомендували себе успішним використанням в

європейській практиці (Eastman, Tieholz, Sacks, & Liston, 2011; Bradley, Lark, & Dunn, 2016; Kensek, & Noble, 2014; Буравлева, Клипина, & Крутилова, 2016; Мамаєв, Шарманов, Золотова, Свинцицкий, & Городнюк, 2016).

Визначено недоліки та переваги параметричної бази, топології різних типів ресурсно-календарних та організаційно-технологічних моделей щодо їх відповідності специфіці реалізації будівельних проектів за схемою девелоперського контракту. Визначено недоцільність застосування для девелоперських схем організації будівництва жодного з традиційних видів організаційно-технологічних моделей.

Отже, нагальним є вирішення проблеми пошуку нового, синтетичного типу для моделі візуалізації та організаційно-технологічного коригування циклу будівельного проекту. Її топологічну конструкцію та розрахункову базу слід вдосконалити, спрямувавши їх на адекватне відображення (на ґрунті ВІМ-технологій), продуктивне і своєчасне коригування руху будівельного проекту – від ініціації до завершення будівництва.

Прийнятою робочою гіпотезою дослідження визначено, що в сучасних реаліях вітчизняного будівельного девелопменту доцільним є узгодження системи девелопменту в будівництві з вимогами і стандартами, визначеними Project Management Institute. Це передбачає включення до складу інструментарію організації будівництва, окрім ВІМ-модулів, також і спеціальних візуальних компонент – «карт чутливості». Зазначені «карти» для формату даного дослідження доцільно представити у вигляді формалізованої (на ґрунті ВІМ-технологій) графоаналітичної візуалізації змін впливу окремих організаційних і технологічних характеристик проекту на підсумкові результати циклу.

На базі гіпотези прийнято наступну постановку задачі: в умовах ініціації і просування в Україні численних будівельних інвестиційних проектів із залученням іноземного капіталу, виникає необхідність системного впровадження девелопменту в підрядне будівництво. Тому нагальною потребою, що потребує вирішення, є адаптація існуючих моделей організації будівництва до формату та змісту ВІМ-технологій, які забезпечують продуктивну візуалізацію та аналізу циклу будівельного девелоперського проекту – від ініціації проекту до завершення дії девелоперського контракту.

Результати

Для потреб успішного впровадження будівельних проєктів у форматі девелопменту розроблено і обґрунтовано методико-прикладний

інструментарій BIM-моделювання та адміністрування будівництва (табл. 1) (Кушнір, & Поколенко, 2018).

Таблиця 1

Загальна структура, зміст та спрямування компонент BIM-інструментарію організаційно-технологічного та структурного моделювання змісту процесів управління та середовища будівельного девелоперського проєкту

№ з/п	Шифр компоненти	Зміст компоненти (моделі)	Детальний зміст компоненти (моделі)
1	BIM-Str	Оргструктура адміністрування будівництвом та внутрішнє середовище проєкту (рис. 1).	1.1 Узгодження на інституційному рівні проєкту та вибір формату будівельного девелопменту, найбільш прийнятого щодо суб'єктів адміністрування та загального змісту проєкту. 1.2 Відображення специфіки та змісту робіт та завдань по стадіях і фазах БДП. Деталізація зміст робіт і стадій по проєкту. 1.3 Пропозиції щодо розподілу праці в оргструктурі адміністрування БДП. 1.4 Визначення загальної типології оргструктури, адаптування її до прийнятої до впровадження формату і концепції девелопменту. 1.5 Розробка та оцінка варіантів оргструктури адміністрування БДП (ОА-БДП). 1.6 Формування BIM-моделі оцінки ОА-БДП. 1.7 Оцінка переваг та недоліків альтернатив ОА-БДП за допомогою кількісних та якісних параметрів із залученням ОПР із оточення проєкту. 1.8 Вибір варіанту ОА-БДП. 1.9 Визначення тривалості та регламенту бізнес-процесів всередині ОА-БДП за рівнями, підрозділами та командами. 1.10 Оцінка внутрішнього середовища БДП за характеристиками виконавчої, функціональної та організаційно-управлінської спроможності по окремим організаціям-виконавцям та в цілому по проєкту. Одержання індикаторів, за якими здійснюватиметься оперативне коригування параметрів робіт. 1.11. Функціонування ОА-БДП впродовж циклу БДП – від ініціації до введення в дію потужностей проєкту (до директивного рівня).
2	BIM-jobs	BIM-роботи будівельного девелоперського проєкту	2.1 Розробка, оцінка та вибір організаційно-технологічного формату – BIM-моделі підготовки та організації будівництва. 2.2 Розробка, оцінка та вибір візуально-графічного формату BIM-моделі. 2.3 Розробка, оцінка та вибір аналітичного формату BIM-моделі, окремо за масивами, параметрами, об'єктами, ділянками, захватками, стадіями та видами робіт. 2.4 Підготовка електронних масивів параметрів за окремими роботами БДП. 2.5 Визначення директивних значень параметрів. 2.6 Побудова аналітичних організаційно-аналітичних функцій зміни значень характеристик виконання робіт від директивних до розрахункових (оперативно-скоригованих) на підставі індикаторів-корелянтів (одержані за підсумками виконання п. 1.10). 2.7 Визначення оперативно-скоригованих значень параметрів за всіма роботами проєкту. 2.8 Остаточний розрахунок масивів параметрів за всіма роботами проєкту.
3	Bim-Int	Інтегрована BIM-модель циклу БДП	3.1. Розробка та прийняття нового переліку аналітичних критеріїв оцінювання варіантів інтегральних моделей Bim-Int(β), де β – номер варіанту. 3.2 Графо-топологічна інтеграція («згортка») окремих робіт в єдину інтегральну модель організації циклу БДП. 3.3 Аналітична фіксація окремих робіт використанням початкових та кінцевих віх (фіксаторів) за окремими масивами-роботами проєкту. 3.4 Розробка варіантів інтегральної моделі Bim-Int(β). Прив'язка варіантів Bim-Int(β), до початку і завершення стадій і фаз циклу (в т.ч. щодо локальних комплексів та об'єктів в складі будівельно-інвестиційного комплексу) та інших пріоритетних подій циклу, які визначені інституційними суб'єктами БДП.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Основою інструментарію є вдосконалена на ґрунті BIM-технологій та нечітко-логічних методів прийняття рішень модель адекватного відображення та своєчасного коригування руху інтегрованих девелопером та замовником ресурсів та управлінських технологій впродовж цілісного циклу БДП – від ініціації до завершення будівництва.

Провідною компонентою інструментарію є модель «BIM-роботи будівельного девелоперського проекту». Змістовно-функціональним призначенням моделі є відтворення у графоаналітичному форматі BIM-технологій організаційно-технологічна модель організації циклу будівельного девелоперського проекту (рис. 1).

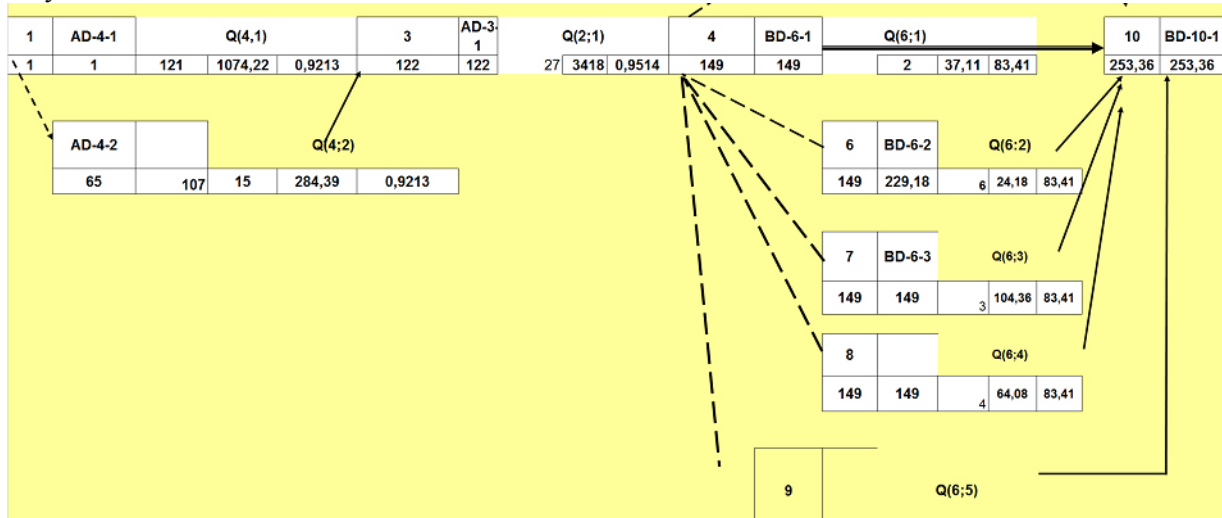


Рис. 1. Фрагмент візуально-аналітичної конструктивної сукупної BIM-моделі адміністрування циклу БДП: BD-6-1 – код BIM-аркушу, де міститься матриця параметрів локального елемента; Q(6;1) – шифр локального елемента (в даному фрагменті – планування будівельного майданчика); 4 – порядковий номер події, що прив'язує план-графік та будівництво до бюджету, тис. грн.; 83,41 – ідентифікована першою компонентою оцінка надійності субпідрядника, % до зразкового стану (100 %)

На відміну від традиційного використання технологій, компоненти яких спрямовані на графічну візуалізацію, технічний та аналітичний опис та вирішення функціональних завдань формування архітектурно-організаційно-технологічної, проектно-кошторисної документації проекту, в даній роботі у форматі технологій представлена цілісна модель життєвого циклу БДП структуризація стадій та робіт здійснюється не за технологічним змістом та розділами проектно-кошторисної документації (ПКД), а за укрупненими комплексами робіт та стадіями БДП, що віддані у виконання певному виконавцеві та регламентовані відповідними тристоронніми «угодами про субпідряд» між замовником, девелопером та виконавцем.

Цілісна модель циклу утворена інтеграцією матрично-структурованих елементів-робіт (BIM-job), які сполучаються між собою спеціальними транзитивними графоаналітичними комунікаціями (типу «вхід & вихід», «вхід & лаг випередження & вихід» тощо). Елемент-робота (BIM-job) є системним описом, який з викорис-

танням візуальних можливостей BIM-технологій включає:

- візуально-графічну модель частини об'єкту (будівлі чи споруди), що є об'єктом діяльності певного субпідрядника;
- графо-морфологічний фрагмент елементу-роботи в складі інтегрованої моделі циклу БДП;
- «matrix-job» – матрицю організаційно-технологічних та адміністративно-управлінських параметрів, частина з яких є суворо детермінованою (нормативною), а решта є коригованою і підлягає уточненню та наступним змінам після оцінювання надійності відповідального виконавця збоку девелопера.

Окрема компонента інструментарію – модель «Оргструктура адміністрування будівництвом та внутрішнє середовище проекту» – забезпечує моделювання, оцінку та вибір варіантів організаційної структури адміністрування проектом. Принциповими інноваціями цієї моделі є оцінка внутрішнього середовища девелоперського проекту через 7-факторну чітко-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

формалізовану комплексну BIM-процедуру (рис. 2) оцінки виробничо-технологічної конкурентоспроможності, економічної надійності та рівня інноваційності субпідрядників проекту. Підсумкова оцінка субпідрядника дає формалізовано оцінити спроможність підприємства-виконавця (субпідрядника БДП) виконати ви-

моги девелопера щодо функціонально-технологічної якості та вартісних характеристик виконання роботи (стадії), що, в свою чергу, дає обґрунтовані підстави девелоперу залишити або вилучити дану організацію із складу виконавців БДП.

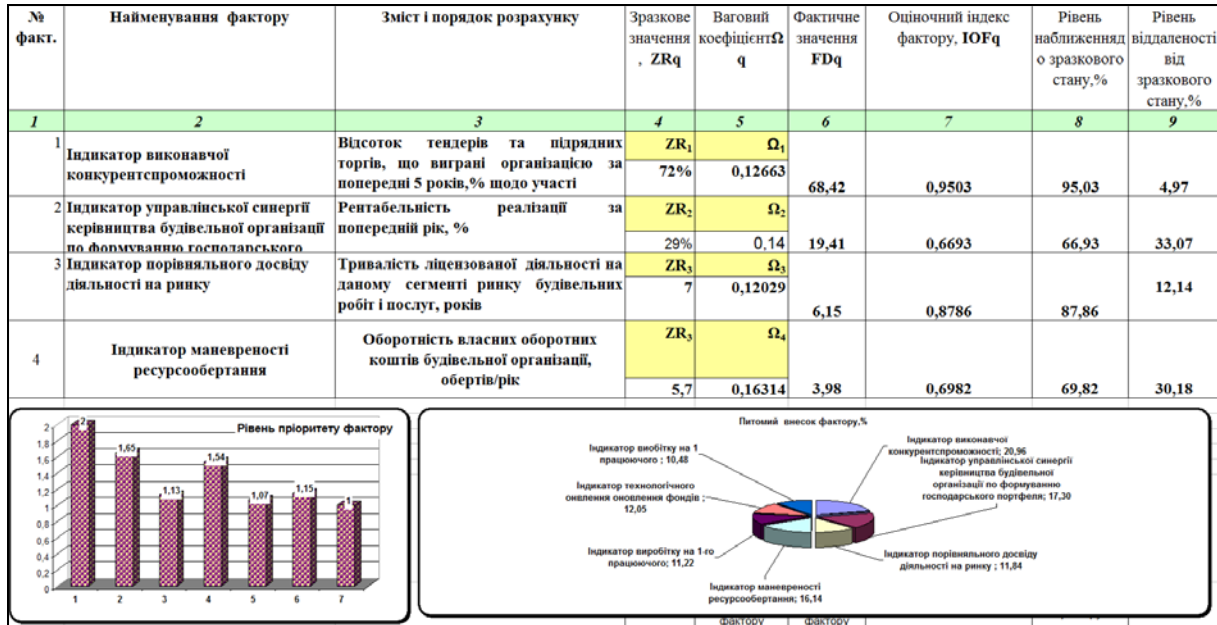


Рис. 2. Матриця оцінки девелопером субпідрядників проекту

Одержана оцінка є формалізованою аналітичною підставою для коригування (змін) значень провідних організаційно-технологічних характеристик виконання робіт (тривалість, кошторисна вартість, додаткові адміністративно-управлінські витрати тощо) в складі організаційно-технологічної моделі циклу БДП. В такий спосіб забезпечується узгодження між нормативними та директивними характеристиками реалізації циклу БДП по окремим роботам і стадіям, деталізованих графоаналітичними розгалуженнями плану-графіку, який інтегрує «роботи-матриці» по окремим родам і стадіям.

Завершальна компонента інструментарію забезпечує на альтернативній основі вибір прийнятної для замовника та девелопера варіанту ресурсно-календарної BIM-моделі організації будівництва (в складі цілісної моделі циклу БДП) узгодження її із зведеним кошторисним розрахунком та девелоперським бюджетом проекту.

Достовірність вибору альтернатив забезпечується формуванням «профілю надійності» БДП та значенням підсумкового індекс-

пріоритету, з допомогою якого визначаються порівняльні (компромісно узгоджені) переваги досліджуваного варіанту щодо іншого. В такий спосіб зазначена компонента забезпечує раціональне узгодження вимог інституційних учасників (замовник, інвестор та девелопер) щодо технологічних, функціональних та вартісних характеристик виконання циклу БДП, в якому організація будівництва є найбільш складною щодо функціонально-технічного змісту, а підготовча фаза (включаючи формування дієвої оргструктури адміністрування) є найбільш відповідальною за підсумки цільового використання ресурсів на формування продукту проект із заздалегідь встановленими параметрами.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна результатів досліджень визначається оригінальністю їх внеску у розвиток організаційного та технологічного моделювання як складової науки «Організація будівництва» та системністю застосування для потреб девелоперського управління, що здійснено че-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

рез інноваційно-упорядковані BIM-моделі нового типу для варіативного моделювання та вибору варіантів організації будівництва з високим рівнем адаптогенних можливостей.

Практична значимість інструментарію BIM-моделювання процесів та середовища організації будівництва визначається тим, що здійснене в роботі вдосконалення змісту та аналітичного конструктивного організаційно-технологічного моделювання та адміністрування будівництва є важливим практичним інструментом успішного девелопменту в будівництві, що дозволяє реалізувати передові організаційно-управлінські та інформаційні технології для потреб девелопменту будівельних проектів.

Обґрунтовані в роботі інноваційні організаційно-структурні та організаційно-технологічні моделі, розроблені на ґрунті BIM-технологій та нечіткої логіки, забезпечують девелоперу спроможність вибору такого варіанту моделі організації будівництва об'єкту в складі циклу адміністрування БДП, яка відповідає директивним вимогам замовника та дозволяє очікувати найвищий для девелопера приріст результатів операційної діяльності від реалізації в обраному форматі організації підготовчої та інвестиційної фаз проектного циклу.

Висновки

Методико-аналітичні результати досліджень, представлені в даній статті, втілено в комплекс прикладних модулів «BIM-модулі адміністрування циклом БДП». Зазначений комплекс програм створює відповідну сучасним потребам будівельного ринку та системі будівельного девелопменту науково-прикладний засіб підготовки, організаційно-технологічного, змістовно-функціонального та адміністративно-управлінського супроводу циклу БДП, забезпечуючи при цьому належну управлінську та організаційно-технологічну експертизу будівельних проектів, якісну підготовку та організацію циклу, мінімізацію ризиків підготовчої та будівельної фаз для замовника та девелопера проекту.

С. І. КУШНИР^{1*}, Е. А. БОНДАРЬ²,
В. О. ПОКОЛЕНКО³, І. Н. ЯКИМЧУК⁴, А. М. ХОМЕНКО⁵

^{1*} Кафедра менеджмента в строительстве, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект, 31, Киев, Украина, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, эл. почта nkc_kiev@ukr.net

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Eastman, C., Tiecholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: a Guide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. Hoboken, New Jersey: John Wiley.
- Bradley, H., Lark, R., & Dunn, S. (2016). BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. *Automation in Construction*, 71(2), 139-152.
- Kensek, K., & Noble, D. (2014). *Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley.
- Бондар, О. А., & Кочедикова, А. С. (2015). Удосконалення організаційно-економічної моделі інноваційної діяльності підприємства. *Управління розвитком складних систем*, 25(1), 75-77.
- Буравлева, А. Ф., Клипина, Н. А., & Крутилова, М. О. (2016). Внедрение BIM-технологий в процесс проектирования и строительства объектов недвижимости. *Вестник научных конференций*, 10-3(14), 36-39.
- Котляров, М. А. (2018). *Основы девелопмента недвижимости*. Москва: Юрайт.
- Кушнір, С. І. (2014). BIM-компоненти вибору виконавців будівельних девелоперських проектів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 30(3), 34-38.
- Кушнір, С. І. (2017). Адміністративні процедури BIM-технологій при реалізації будівельних проектів. *Управління розвитком складних систем*, 29(2), 143-151.
- Кушнір, С. І., & Поколенко, В. О. (2018). Методико-прикладний інструментарій організації будівництва на ґрунті BIM-технологій. *Управління розвитком складних систем*, 30(2), 155-162.
- Мамаев, А. Е., Шарманов, В. В., Золотова, Ю. С., Свиницкий, В. А., & Городнюк, Г. С. (2016). Прикладное применение BIM-модели здания для контроля инвестиционно-строительного проекта. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*, 1-3, 83-87.
- Талапов, В. В. (2015). *Технология BIM. Суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий*. Москва: ДМК Пресс.
- Талапов, В. В. (2017). *Введение в информационное моделирование зданий*. Саратов: Профобразовани.

² Кафедра менеджмента в строительстве, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект, 31, Киев, Украина, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, эл. почта alenka_bon@i.ua, ORCID 0000-0002-4633-6859

³ Кафедра менеджмента в строительстве, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект, 31, Киев, Украина, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, эл. почта nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0003-1750-5964

⁴ Кафедра менеджмента в строительстве, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект, 31, Киев, Украина, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, эл. почта nkc_kiev@ukr.net

⁵ Кафедра менеджмента в строительстве, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект, 31, Киев, Украина, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, эл. почта nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0002-6242-4736

ПРИМЕНЕНИЕ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОТРЕБНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИКЛА СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОЕКТА И АДМИНИСТРИРОВАНИЯ ЕГО СРЕДОЙ

Цель. Разработка на основе BIM-технологий расчетно-методического инструментария организационно-технологического моделирования и выбора вариантов организации строительства и формализованного администрирования цикла строительного девелоперского проекта. **Методика.** Применены основы прикладного инструментария организации строительства в составе жизненного цикла строительных проектов, основанные на привлечении BIM-моделей для потребностей подготовки и администрирования таких проектов в формате современного девелопмента. **Результаты.** Определено, что в современных реалиях отечественного строительного девелопмента целесообразно согласование системы девелопмента в строительстве с требованиями и стандартами, определенными Project Management Institute. Выполнена адаптация существующих моделей организации строительства к формату и содержанию BIM-технологий, которые обеспечивают производительную визуализацию и анализ цикла строительного девелоперского проекта. Для потребностей успешного внедрения строительных проектов в формате девелопмента разработан и обоснован методико-прикладной инструментарий BIM-моделирования и администрирования строительства. **Научная новизна.** Определяется оригинальностью результатов проведенного исследования и их вклада в развитие организационного и технологического моделирования как составляющей науки «Организация строительства» и системностью применения для потребностей девелоперского управления. **Практическая значимость.** Существенное совершенствование содержания аналитического конструктивного организационно-технологического моделирования и администрирования строительства является важным практическим инструментом успешного девелопмента в строительстве и позволяет реализовать передовые организационно-управленческие и информационные технологии для потребностей девелопмента строительных проектов.

Ключевые слова: организация строительства; строительный девелоперский проект (БДП); BIM-инструментарий организационно-технологического моделирования и администрирования цикла БДП; организационно-технологическая модель строительства

S. I. KUSHNIR^{1*}, O. A. BONDAR²,
V. O. POKOLENKO³, I. M. YAKYMCHUK⁴, O. M. KHOMENKO⁵

^{1*} Department of Management in Construction of The Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky Avenue, 31, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38 (044) 241 54 98, e-mail nkc_kiev@ukr.net

² Department of Management in Construction of The Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky Avenue, 31, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38 (044) 241 54 98, e-mail alenka_bon@i.ua, ORCID 0000-0002-4633-6859

³ Department of Management in Construction of The Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky Avenue, 31, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38 (044) 241 54 98, e-mail nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0003-1750-5964

⁴ Department of Management in Construction of The Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky Avenue, 31, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38 (044) 241 54 98, e-mail nkc_kiev@ukr.net

⁵ Department of Management in Construction of The Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky Avenue, 31, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38 (044) 241 54 98, e-mail nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0002-6242-4736

APPLICATION OF BIM-TECHNOLOGIES FOR THE NEEDS OF MODELING A CYCLE OF A CONSTRUCTION PROJECT AND ADMINISTRATION OF ITS MEDIUM

Purpose. Development on the basis of BIM-technologies of calculation and methodological tools of organizational and technological modeling and the selection of options for organizing construction and formalized administration of the cycle of a construction development project. **Methodology.** The basics of applied tools for the organization of construction as part of the life cycle of construction projects, based on engaging BIM models for the needs of preparing and administering such projects in the format of modern development, are applied. **Findings.** It was determined that in the modern realities of the domestic construction development, it is advisable to coordinate the development system in construction with the requirements and standards defined by the Project Management Institute. The adaptation of the existing models of the organization of construction to the format and content of BIM-technologies, which provide productive visualization and analysis of the cycle of the construction development project, has been completed. For the needs of the successful implementation of construction projects in the development format, the methodological and applied tools of BIM-modeling and construction management have been developed and substantiated. **Originality** is determined by the originality of the results of the study and their contribution to the development of organizational and technological modeling as a component of the “Construction Management” science and systemic application for the needs of developer management. **Practical value.** The accomplished improvement of the content of analytical constructive organizational and technological modeling and administration of construction is an important practical tool for successful development in construction and allows for the implementation of advanced organizational, managerial and information technologies for the needs of development of construction projects

Keywords: organization of construction; construction development project (CDP); BIM-toolkit of organizational-technological modeling and CPD-cycle administration; organizational and technological model of construction

REFERENCES

- Eastman, C., Tiecholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: a Guide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. Hoboken, New Jersey: John Wiley. (in English)
- Bradley, H., Lark, R., & Dunn, S. (2016). BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. *Automation in Construction*, 71(2), 139-152. (in English)
- Kensek, K., & Noble, D. (2014). *Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley. (in English)
- Bondar, O. A., & Kochedykova, A. Ye. (2015). Udoshkonalennia orhanizatsiino-ekonomichnoi modeli innovatsiinoi diialnosti pidpriemstva. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, 25(1), 75-77. (in Ukrainian)
- Buravleva, A. F., Klipina, H. A., & Krutilova, M. O. (2016). Vnedrenie BIM-tehnologij v process proektirovaniia i stroitel'stva obektov nedvizhimosti. *Vestnik nauchnykh konferencij*, 10-3(14), 36-39. (in Russian)
- Kotljarov, M. A. (2018). *Osnovy razvitiia nedvizhimosti*. Moskva: Jurajt. (in Russian)
- Kushnir, S. I. (2014). BIM-komponenty vyboru vykonavtsiv budivnykh developerskykh proektiv. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 30(3), 34-38. (in Ukrainian)
- Kushnir, S. I. (2017). Administratyvni protsedury BIM-tehnologii pry realizatsii budivnykh proektiv. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, 29(2), 143-151. (in Ukrainian)
- Kushnir, S. I., & Pokolenko, V. O. (2018). Metodyko-prykładnyi instrumentarii orhanizatsii budivnytstva na gruntii BIM-tehnologii. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, 30(2), 155-162. (in Ukrainian)
- Mamaev, A. E., Sharmanov, V. V., Zolotova, Ju. S., Svincickij, V. A., & Gorodnjuk, G. S. (2016). Prikładnoe primeneniie BIM-modeli zdaniia dlja kontrolja investicionno-stroitel'nogo proekta. *Aktual'nye proble-my gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 1-3, 83-87. (in Russian)
- Talapov, V. V. (2015). *Tehnologija BIM. Sut' i osobennosti vnedrenija informacionnogo modelirovaniia zdaniij*. Moskva: DMK Press. (in Russian)
- Talapov, V. V. (2017). *Vvedeniie v informacionnoe modelirovaniie zdaniij*. Saratov: Profobrazovanie. (in Russian)

Надійшла до редколегії 03.06.2019

Прийнята до друку 11.06.2019

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.745.1-049.7

А. І. ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО

Кафедра «Мости і тунелі», Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (044) 280 79 78, ел. пошта albert.lantoukh@ntu.edu.ua, ORCID 0000-0002-6642-2359

СТОХАСТИЧНА ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СПОРУДИ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ МОСТАМИ

Мета. Мета роботи полягає в розробці моделі оцінки технічного стану споруди в функції часу експлуатації. Теоретичним базисом розробки моделі стохастичної рейтингової оцінки технічного стану споруди в процесі експлуатації є марковська теорія випадкових процесів. Розглядаються феноменологічні моделі кумулятивного накопичення пошкодженого внаслідок природної деградації елементів в процесі життєвого циклу експлуатації. Знос елемента споруди описується марковським дискретним процесом з неперервним часом. Марковський процес, еволюція якого з часом залежить тільки від фіксованого сучасного стану, знайшов широке застосування в системі експлуатації автодорожніх мостів. Деградація елементів в процесі експлуатації розглядається як потік відмов, що фізично є проявом пошкоджень елементів споруди під впливом навантажень і оточуючого середовища. Деградація елементів моста трактується як стаціонарний простіший потік пуассонівського типу. Математична модель випадкового процесу з безперервним часом і дискретними станами описується відомими рівняннями Колмогорова-Чепмена. **Методика.** Теоретичне дослідження процесів деградації елементів мостів виконане в рамках теорії ймовірностей і математичної статистики. **Результати.** Отримана модель експертної рейтингової оцінки технічного стану споруди розбудована на основі матриці переходів залежної від часу. Доведено, що матриця переходів розбудована за даними системи експлуатації є найбільш реалістичною основою для прогнозу процесів деградації. Виконано аналіз зарубіжних досліджень робіт присвячених методиці отримання матриці переходів. Наводиться повний алгоритм обчислення рейтингової оцінки технічного стану споруди. Алгоритм моделі ілюструється практичним прикладом. **Наукова новизна.** Виконане дослідження є піонерним. Вперше в системі експлуатації автодорожніх мостів пропонується стохастична експертна оцінка технічного стану споруди. **Практичне значення.** Отримана модель є практичним інструментом управління надійністю і ресурсом автодорожніх мостів.

Ключові слова: автодорожні мости; експертна оцінка; марковська модель деградації; матриця переходів; інформаційна технологія управління мостами

Вступ

Дослідження, основні результати якого подаються в статті, є одним із перших, що має за мету розробку стохастичної моделі оцінки технічного стану споруди в автоматизованій системі управління мостами. В інших термінах, мова йдеться про рейтингову оцінку залишкового ресурсу в функції часу експлуатації.

Проблема рейтингової оцінки технічного стану споруд на мережі автомобільних доріг стає все більш актуальною з ростом кількості мостів, які потребують капітального ремонту чи реконструкції. Розроблена в останні роки і втілена в нормативні документи оцінка технічного стану елементів мостів на основі концепції надійності (Lantoukh-Liashchenko, 2006; Лан-

тух-Лященко, 2008; Лантух-Лященко, 2009; Lantoukh-Liashchenko, 2011) дає детерміністичну рейтингову оцінку стану споруд ранжируваних за потребою ремонтів.

Для інтегральної оцінки технічного стану мосту згідно чинному нормативному документу ДСТУ-Н (ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012, 2012) введено формалізовану експертну оцінку споруди в цілому, яка є узагальненою характеристикою експлуатаційної придатності за станом всіх його елементів, кількісним показником експертного визначення технічного стану споруди (мостового переходу в цілому). Ми ж в цій роботі пропонуємо альтернативну оцінку, залежну від часу експлуатації.

Почнемо з термінологічного поняття. Вже декілька століть інженери-мостовики всього

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

світу складають експертні оцінки технічного стану мостів, що базуються на використанні колективної думки експертів. В класичному розумінні науково-технічна оцінка визначення експлуатаційного стану елемента споруди ґрунтується на припущенні, що на основі думок експертів можна збудувати адекватну модель деградації. Це детерміністична числова оцінка. Відправною інформацією при цьому є дані обстежень і випробовувань.

Сьогодні, в епоху бурхливого розвитку інформаційних технологій, це поняття в експлуатації споруд набуло нового значення – оцінки, яка *генерується автоматизовано* в інформаційній системі управління мостами. Вихідними даними при цьому є база знань системи, яка містить дані обстежень і випробовувань, модель деградації, модель прогнозування технічного стану тощо. Тобто оцінка-рейтинг є елементом автоматизованого апарату управління безпекою і надійністю споруди і *служить для експерта інструментом* прогнозування технічного стану споруди, стратегічного планування фінансування системи експлуатації на мережевому рівні. Саме в такому розумінні термін «експертна оцінка» застосовується в нашому дослідженні.

Мета дослідження

Мета досліджень полягає в розробці моделі оцінки технічного стану споруди в функції часу експлуатації. Далі мета роботи деталізується формулюванням задачі дослідження.

Методика дослідження

Теоретичним базисом розробки моделі стохастичної рейтингової оцінки технічного стану споруди в процесі експлуатації є марковська теорія випадкових процесів. Розглядаються феноменологічні моделі кумулятивного накопичення пошкодженого внаслідок природної деградації елементів в процесі життєвого циклу експлуатації. Знос елемента споруди описується марковським дискретним процесом з неперервним часом (Богдановф, & Козин, 1989). Марковським вважається процес, еволюція якого з часом залежить тільки від фіксованого сучасного стану.

Деградацію елементів в процесі експлуатації будемо розглядати як потік відмов, що фізично

є проявом пошкоджень елементів споруди під впливом навантажень і оточуючого середовища. Розглядається стаціонарний простіший потік пуассонівського типу (Bogdanoff, 1978a; Bogdanoff, & Krieger, 1978; Bogdanoff, 1978b).

Математична модель випадкового процесу з безперервним часом і дискретними станами описується відомими рівняннями Колмогорова-Чепмена:

$$\frac{d\mathbf{P}(i, t)}{dt} = \mathbf{P}(i, t) \cdot \mathbf{E}, \quad (1)$$

де $\mathbf{P}(i, t)$ – матриця ймовірностей переходу; i – номер дискретного стану; t – час; \mathbf{E} – матриця інтенсивностей переходу.

(Зауваження. Матрицю ймовірностей переходу $\mathbf{P}(i, t)$ далі будемо записувати без параметрів – \mathbf{P} і називати скорочено *матрицею переходів*).

До матриці переходів додається вектор початкових ймовірностей станів, яким задається розподіл абсолютних ймовірностей на початку процесу.

Матрицею переходів \mathbf{P} разом з вектором початкових ймовірностей повністю характеризується марковська модель випадкового процесу.

Ставиться задача розбудови моделі експертної рейтингової оцінки технічного стану споруди на основі матриці переходів \mathbf{P} , залежної від часу і вектора початкових ймовірностей станів отриманих статистичним аналізом бази даних інформаційної системи управління.

Модель експертної рейтингової оцінки технічного стану споруди формулюється на основі матриці переходів \mathbf{P} залежної від часу. Кожен елемент цієї матриці p_{ij} є ймовірність того, що система перейде від стану i до стану j протягом певного періоду часу. Тоді якщо відомий початковий стан \mathbf{p}_0 , то майбутній стан елемента може бути прогнозованим на будь-який довільний час t .

Майбутній вектор стану \mathbf{p} , отримується шляхом множення початкового стану вектору \mathbf{p}_0 на матрицю переходів \mathbf{P} в ступені t (число років) (Bogdanoff, 1978a; Bogdanoff, & Krieger, 1978; Bogdanoff, 1978b; Богдановф, & Козин, 1989). Початковий стан системи задається матрицею-стрічкою \mathbf{p}_0 розміром $[1 \times n]$:

$$\mathbf{p}_0 = [p_1, p_2, \dots, p_n], \quad (2)$$

де p_i – ймовірність перебування в стані $i = 1,$

2, ..., n; n – кількість дискретних станів.

Вектор стану системи на час t визначається як добуток матриці переходів \mathbf{P} на вектор початкового стану системи

$$\mathbf{p}_t = \mathbf{p}_0 \times \mathbf{P}^t, \quad (3)$$

де \mathbf{P}^t – матриця переходів \mathbf{P} в ступені t ; \mathbf{p}_0 – вектор ймовірностей перебування в початковому стані.

Далі вводиться вектор фіксованих рейтингових експертних оцінок на початку процесу, розміром $[n \times 1]$:

$$\mathbf{d} = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T, \quad (4)$$

тут T – знак транспонування; r_i – рейтингові оцінки, дійсні числа, $i = 1, 2, \dots, n$.

Оцінка технічного стану елемента споруди на довільний час t визначається залежністю

$$D_t = \mathbf{p}_0 \times \mathbf{P}^t \times \mathbf{d}, \quad (5)$$

де D_t – скаляр, рейтингова оцінка елемента споруди на час t ; \mathbf{p}_0 – матриця-стрічка ймовірностей перебування в початковому стані t_0 розміром $[1 \times n]$; \mathbf{P}^t – матриця ймовірностей переходів \mathbf{P} в ступені t розміром $[n \times n]$.

Рейтингова оцінка технічного стану споруди визначається як середньозважена з складових елементів споруди (ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012, 2012):

$$E = \frac{80(5 - \sum_{i=1}^{i=k} \alpha_i D_i)}{4} + 20, \quad (6)$$

де D_i – номер експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди; α_i – коефіцієнти впливу стану i -ї групи елементів на загальний стан споруди (нормалізовані коефіцієнти ваги); k – кількість груп елементів споруди.

Результати досліджень

Отримання матриці переходів за статистичними даними системи експлуатації

В теорії споруд сьогодні поширеним є статистичний підхід формулювання матриці переходів, в основі якого лежать історичні дані системи експлуатації. Вважається, що матриця переходів, розбудована за даними системи експлуатації, є найбільш реалістичною основою для прогнозу процесів деградації.

Практичному застосуванню матриці переходів, розбудованої за статистичними даними, присвячена велика кількість зарубіжних досліджень, в яких розглядаються особливості матриць переходів, пов'язані з системою експлуатації мостів різних країн (Collins, 1974; NG, & Moses, 1996; Zhang, Sun, & Wang, 2003; Yasunari, 2006). Більшість з них базуються на залежностях теорії ймовірностей, отриманих Дж. Богдановим і Ф. Козіним (1989), де розподіл дискретних станів для кожного року $\mathbf{p}(t)$, отримано в результаті множення розподілу попереднього стану на матрицю переходу \mathbf{P}_0 :

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}(t-1) \times \mathbf{P}_0, \quad (7)$$

де $\mathbf{p}(t-1)$ – вектор попереднього розподілу станів.

Ми скористаємося найпростішим з них – оцінюванням відносної кількості елементів мостів в кожному із станів. Компоненти матриці перехідних ймовірностей визначаються за рівнянням:

$$p_{ij} = n_{ij} / n_i, \quad (8)$$

де n_{ij} – кількість переходів зі стану i в стан j протягом заданого періоду часу; n_i – загальна кількість елементів мостів в стані i на початок заданого періоду часу.

В такій постановці кожен елемент матриці перехідних ймовірностей \mathbf{P} є ймовірність того, що елемент, який був в стані i , перейде в стан j за один крок (тобто за один рік). При цьому вважається, що відсутні експлуатаційні втручання, тому піддіагональні елементи матриці \mathbf{P} є нульовими.

Покажемо процедуру отримання матриці перехідних ймовірностей на прикладі статистичних даних отриманих з системи експлуатації автодорожніх мостів. Розглянемо історичні дані експлуатації залізобетонних мостів. Розподіл за станами залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів наведено нижче в таблиці 1.

З таблиці 1 отримаємо вектор наддіагональних елементів матриці перехідних ймовірностей \mathbf{P} : \mathbf{p}_{ij} , $i = 1, 2, 3, \dots, 4$; $j = i + 1$:

$$\mathbf{p}_{ij} = [0,016 \ 0,108 \ 0,610 \ 0,249]^T. \quad (9)$$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблиця 1
Розподіл за експлуатаційним станом прогнозових будов автодорожніх мостів

Стан	В абсолютних показниках, од.	У відсотках, %
1	112	1,6
2	758	10,8
3	4288	61,0
4	1751	24,9
5	122	1,7
Всього:	7031	100,00

Відповідна матриця перехідних ймовірностей матиме значення:

$$P = \begin{bmatrix} 0,984 & 0,016 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,892 & 0,108 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,390 & 0,610 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,975 & 0,025 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Приклад обчислення рейтингової оцінки прогнозової будови моста

Вихідними є статистичні дані розподілу прогнозових будов мостів за станами на час прогнозу. Прийемо ці дані згідно табл. 1., за даними якої по формулі (8) обчислюються наддіагональні компоненти матриці перехідних ймовірностей. Діагональні компоненти матриці P обчислюються як доповнення до 1 наддіагональної компоненти. Сформована матриця перехідних ймовірностей наведена в залежності (10). Далі задається вектор початкових ймовірностей станів елемента системи p_0 формули (2).

Введемо 100-бальну шкалу рейтингової оцінки (табл. 2). (Зауважимо, що шкала рейтингової оцінки є загальною для всіх типів елементів споруди.)

Таблиця 2

Рейтингова оцінка експлуатаційного стану елементів споруди	
Експлуатаційний стан	Оціночна шкала, балів
Стан 1. Справний	100...79
Стан 2. Обмежено справний	80...59
Стан 3. Працездатний	60...39
Стан 4. Обмежено працездатний	40...19
Стан 5. Непрацездатний	≤ 20

Згідно з прийнятою шкалою, задається вектор початкових станів (вектор фіксованих рейтингових оцінок безпечної експлуатації формула (5)):

$$d = [100 \ 80 \ 60 \ 40 \ 20]^T. \quad (11)$$

Задається матриця-стрічка p_0 ймовірностей перебування в початковому стані 1 формула (2):

$$p_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (12)$$

Обчислюється рейтингова оцінка технічного стану елемента споруди що перебуває в стані 1 на час $t - 1$ формула (6):

$$D_1 = p_0 \times P \times d = 99,7. \quad (13)$$

Обчислення повторюються для векторів-стрічок p_0 :

$$\text{стану 2: } p_0 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]; D_2 = 77,8; \quad (14)$$

$$\text{стану 3: } p_0 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]; D_3 = 47,8; \quad (15)$$

$$\text{стану 4: } p_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]; D_4 = 39,5; \quad (16)$$

$$\text{стану 5: } p_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]; D_5 = 20,0. \quad (17)$$

Цей приклад повторимо ще раз, щоби отримати прогнозні оцінки на період $t = 5$ років.

Відповідна матриця ймовірностей переходів обчислюється тепер як P в ступені t , $P_5 = P^5$:

$$P_5 = \begin{bmatrix} 0,922 & 0,062 & 0,008 & 0,007 & 0 \\ 0 & 0,565 & 0,120 & 0,395 & 0,011 \\ 0 & 0 & 0,009 & 0,909 & 0,082 \\ 0 & 0 & 0 & 0,881 & 0,119 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Всі обчислення оцінок прикладу зведемо в табл. 3.

Таблиця 3

Рейтингові оцінки залізобетонних прогнозових будов, отримані в прикладі

Стан	Оцінки		
	Фіксовані	На період 1 рік	На період 5 років
1	100	99,7	98,0
2	80	77,8	64,8
3	60	47,8	38,5
4	40	39,5	37,6
5	20	20,0	20,0

Наукова новизна та практична значимість

Наведена в роботі модель експертної оцінки технічного стану споруди в функції часу експлуатації базується на марковській стохастичній теорії накопичення пошкоджень добре обґрунтована теоретично і має практичну спрямованість як інструмент оцінки технічного стану та прогнозу залишкового ресурсу в автоматизованій інформаційній системі управління безпекою і довговічністю споруди.

Висновки

Центральна наукова ідея дослідження полягає у використанні для обчислення експертних оцінок матриці перехідних ймовірностей марковського процесу, отриманої на час оцінки з статистичного аналізу даних історії експлуатації. Переваги такого підходу очевидні – матриця переходів, отримана в такий спосіб, досить точно описує процес деградації протягом всього життєвого циклу експлуатації. Порівняно з нею матриця переходів постійна протягом життєвого циклу експлуатації, яка застосовується зараз для експертної оцінки технічного стану споруди, є всього лиш першим наближенням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Bogdanoff, J. L. (1978a). A new cumulative damage model-Part 1. *Journal of Applied Mechanics*, 45, 246-250.
- Bogdanoff, J. L., & Krieger, W. (1978). A new cumulative damage model-Part 2. *Journal of Applied Mechanics*, 45, 251-257.
- Bogdanoff, J. L. (1978b). A new cumulative damage model-Part 3. *Journal of Applied Mechanics*, 45, 733-739.

А. И. ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО

Кафедра «Мосты и тоннели», Национальный транспортный университет, ул. М. Емельяновича-Павленко 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (044) 280 79 78, эл. почта albert.lantoukh@ntu.edu.ua, ORCID 0000-0002-6642-2359

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СООРУЖЕНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МОСТАМИ

Цель. Цель работы заключается в разработке модели оценки технического состояния сооружения в функции времени эксплуатации. Теоретическим базисом разработки модели стохастической рейтинговой оценки технического состояния сооружения в процессе эксплуатации, является марковская теория случайных процессов. Рассматриваются феноменологические модели кумулятивного накопления поврежденных

- Collins, L. (1974). Estimating Markov Transition Probabilities from Micro-Unit Data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 23, 355-371.
- NG, S-K., & Moses, F. (1996). *Prediction of bridge service life using time-dependent reliability analysis*, Bridge Management. Inspection, Maintenance, Assessment and Repair: Proceedings of the Third International Conference. New York: Taylor & Francis.
- Lantoukh-Liashchenko, A. (2006). *Reliability based Service Life Prediction of Concrete Bridge Superstructures*, Proceeding "EKO MOST 2006. Durable bridge structures in the environment", Kielce, 16-17 May 2006 / Warszawa.
- Lantoukh-Liashchenko, A. (2011). *Markov chain models for the residual service life prediction of bridges*, 4-th International Conference FOOTBRIDGE 2011: Wroclaw, Poland.
- Yasunari, I. (2006). *Estimating continuous time transition matrices from discretely observed data*. Financial Systems and Bank Examination Department, Bank of Japan.
- Zhang, Z., Sun, X., & Wang, X. (2003). *Determination of Bridge Deterioration Matrices with State National Bridge Inventory Data*, 9-th International Bridge Management Conference.
- Богдановф, Дж., & Козин, Ф. (1989). *Вероятностные модели накопления повреждений*. Москва: Мир.
- ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 (2012). Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ: Мінрегіонбуд України.
- Лантух-Лященко, А. І. (2008). Уточнення оцінки експлуатаційного стану мостів. *Дороги і мости*, 9, 12-18.
- Лантух-Лященко А. И. (2009). Марковские модели накопления повреждений. *Наука и искусство. Промислове будівництво та інженерні споруди*, 2, 22-25.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

вследствие естественной деградации элементов в процессе жизненного цикла эксплуатации. Износ элемента сооружения описывается марковским дискретным процессом с непрерывным временем. Марковский процесс, эволюция которого со временем зависит только от фиксированного современного состояния, нашел широкое применение в системе эксплуатации автодорожных мостов. Деградация элементов в процессе эксплуатации рассматривается как поток отказов, физически являющимся проявлением повреждений элементов сооружения под воздействием нагрузок и окружающей среды. Деградация элементов мостов трактуется как стационарный простейший поток пуассоновского типа. Математическая модель случайного процесса с непрерывным временем и дискретными состояниями описывается известными уравнениями Колмогорова-Чепмена. **Методика.** Теоретическое исследование процессов деградации элементов мостов выполненное в рамках теории вероятностей и математической статистики. **Результаты.** Полученная модель экспертной рейтинговой оценки технического состояния сооружения построена на основе матрицы переходов зависящей от времени. Доказано, что матрица переходов развита по данным системы эксплуатации является наиболее реалистичной основой для прогноза процессов деградации. Выполнен анализ зарубежных исследований работ, посвященных методике получения матрицы переходов. Приводится полный алгоритм вычисления рейтинговой оценки технического состояния сооружения. Алгоритм модели иллюстрируется практическим примером. **Научная новизна.** Проведенное исследование является пионерным. Впервые в системе эксплуатации автодорожных мостов предлагается стохастическая экспертная оценка технического состояния сооружения. **Практическое значение.** Полученная модель является практическим инструментом управления надежностью и ресурсом автодорожных мостов.

Ключевые слова: автодорожные мосты; экспертная оценка; марковская модель деградации; матрица переходов; информационная технология управления мостами

A. I. LANTUH-LYASHCHENKO

Department «Bridges and tunnels», National Transport University, st. M. Emelyanovich-Pavlenko 1, Kiev, Ukraine, 01010, tel. +38 (044) 280 79 78, e-mail albert.lantoukh@ntu.edu.ua, ORCID 0000-0002-6642-2359

STOCHASTIC EXPERT ESTIMATION OF TECHNICAL CONDITION OF CONSTRUCTION IN AUTOMATED C-STEAM OF CONTROL OF BRIDGES

Purpose. The purpose of the work is to develop a model for assessing the technical condition of a structure as a function of the operation time. The theoretical basis for the development of a stochastic rating model for the technical condition of a structure during operation is the Markov theory of random processes. Phenomenological models of cumulative accumulation of damaged due to the natural degradation of elements during the life cycle of operation are considered. The wear of the structure element is described by a Markov discrete process with continuous time. The Markov process, whose evolution over time depends only on a fixed modern state, has found wide application in the system of operation of road bridges. Degradation of elements during operation is considered as a stream of failures that are physically a manifestation of damage to the elements of a structure under the influence of loads and the environment. The degradation of bridge elements is interpreted as a stationary simplest flow of Poisson type. A mathematical model of a random process with continuous time and discrete states is described by the well-known Kolmogorov-Chapman equations. **Methodology.** Theoretical study of the processes of degradation of elements of bridges made in the framework of probability theory and mathematical statistics. **Findings.** The resulting model of expert rating assessment of the technical condition of the facility is based on a time dependent transition matrix. It is proved that the transition matrix developed according to the operating system is the most realistic basis for the prediction of degradation processes. The analysis of foreign studies of works on the method of obtaining a transition matrix was performed. A complete algorithm for calculating the rating assessment of the technical condition of the structure is given. The model algorithm is illustrated by a practical example. **Scientific novelty.** The study is pioneering. For the first time in the system of operation of road bridges, a stochastic expert assessment of the technical condition of the structure is proposed. **Practical value.** The resulting model is a practical tool for managing the reliability and resource of road bridges.

Keywords: road bridges; expert assessment; Markov degradation model; transition matrix; information technology for managing bridges

REFERENCES

- Bogdanoff, J. L. (1978a). A new cumulative damage model-Part 1. *Journal of Applied Mechanics*, 45, 246-250.
- Bogdanoff, J. L., & Krieger, W. (1978). A new cumulative damage model-Part 2. *Journal of Applied Mechanics*, 45, 251-257. (in English)
- Bogdanoff, J. L. (1978b). A new cumulative damage model-Part 3. *Journal of Applied Mechanics*, 45, 733-739. (in English)
- Collins, L. (1974). Estimating Markov Transition Probabilities from Micro-Unit Data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 23, 355-371. (in English)
- NG, S-K., & Moses, F. (1996). *Prediction of bridge service life using time-dependent reliability analysis*, Bridge Management. Inspection, Maintenance, Assessment and Repair: Proceedings of the Third International Conference. New York: Taylor & Francis. (in English)
- Lantoukh-Liashchenko, A. (2006). *Reliability based Service Life Prediction of Concrete Bridge Superstructures*, Proceeding "EKO MOST 2006. Durable bridge structures in the environment", Kielce, 16-17 May 2006 / Warszawa. (in English)
- Lantoukh-Liashchenko, A. (2011). *Markov chain models for the residual service life prediction of bridges*, 4-th International Conference FOOTBRIDGE 2011: Wroclaw, Poland. (in English)
- Yasunari, I. (2006). *Estimating continuous time transition matrices from discretely observed data*. Financial Systems and Bank Examination Department, Bank of Japan. (in English)
- Zhang, Z., Sun, X., & Wang, X. (2003). *Determination of Bridge Deterioration Matrices with State National Bridge Inventory Data*, 9-th International Bridge Management Conference. (in English)
- Bogdanoff, Dzh., & Kozin, F. (1989). *Veroyatnostnye modeli nakopleniya povrezhdenij*. Moskva: Mir. (in Russian)
- DSTU-N B.V.2.3-23:2012 (2012). *Sporudy transportu. Nastanova z otsiniuvannia i prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Lantukh-Liashchenko, A. I. (2008). Utochnennia otsinky ekspluatatsiinoho stanu mostiv. *Dorohy i mosty*, 9, 12-18. (in Ukrainian)
- Lantuh-Ljashhenko A. I. (2009). Markovskie modeli nakopleniya povrezhdenij. *Nauka i iskusstvo. Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*, 2, 22-25. (in Russian)

Надійшла до редколегії 28.05.2019

Прийнята до друку 06.06.2019

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.114:519.6

Я. С. ЛЕЙБУК¹, О. О. СКОРИК², Н. О. МУРИГІНА³, А. С. ЗВЕРЄВА^{4*}

¹ Кафедра «Колія та колійне господарство», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, ел. пошта leibuk@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-1810-0910

² Кафедра «Колія та колійне господарство», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, ел. пошта s.a.0317@ukr.net, ORCID 0000-0002-0943-7482

³ Кафедра «Колія та колійне господарство», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, ел. пошта murygina@kart.edu.ua

^{4*} Кафедра «Колія та колійне господарство», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, ел. пошта farwww@ukr.net, ORCID 0000-0002-4832-3760

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПРИВЕДЕНОЇ МАСИ КОЛІЇ

Метою роботи є визначення приведеної маси ґрунту, який бере участь в коливаннях по замірах динамічних напружень у земляному полотні. **Методика.** У дослідженні було використано динамічний стабілізатор колії ДСП-С4 на магістральній колії. Були задані дві частоти роботи, які дорівнюють динамічним коливанням від рухомого складу потяга. Під час дослідження були зроблені заміри прискорень колії за допомогою акселерометра, який був розміщений на підшві рейки. **Результати.** Згодом були побудовані графіки прискорень колій, в залежності від заданої частоти та відстані до динамічного навантаження. Для магістральних шляхів необхідно визначити вплив сил інерції в вертикальній площині. Для визначення цього значення необхідно знайти задану масу шляху, для цього проведено експеримент в польових умовах з використанням динамічного стабілізатору шляху. Були задані дві частотні характеристики 10 і 27 Гц, під час яких вимірювання прискорення швидкості проводилися з використанням акселерометра, який був розташований на шийці рейки. Згодом були побудовані графіки прискорення шляхів в залежності від заданої частоти і відстані до динамічного навантаження. Для визначення інерційних та дисипативних характеристик колії для континуальної та дискретної моделей були проведені експериментальні дослідження на вимушені коливання колії. При цьому система вводилась в резонанс, що підвищує достовірність отриманих значень приведеної маси та коефіцієнту дисипації. В більшості відомих на теперішній час досліджень використовується експериментальний метод, в якому приведену масу визначають шляхом за виміром вертикальних прискорень в деяких фіксованих поперечних перерізах рейки при переході через ці перерізи коліс рухомого складу, а саме в нерухомій системі координат. **Наукова новизна.** При визначенні інерційних та дисипативних характеристик колії в якості збудника вимушених коливань використано динамічний стабілізатор колії ДСП-С4, під час проходження якого моделювався рух пасажирського потягу. **Практична значимість** полягає в тому, що була розроблена методика визначення інерційних та дисипативних характеристик колії на вимушені коливання.

Ключові слова: залізнична колія; динамічний стабілізатор; приведена маса колії; чисельні дослідження

Вступ

Дослідженню характеристик коливального процесу залізничної колії присвячено ряд робіт. Але через велику відмінність в значеннях параметрів, отриманих за різними методиками, навіть для дискретної моделі колії, доцільно продовжити дослідження з метою уточнення вказаних параметрів. Для визначення інерційних та дисипативних характеристик колії для континуальної та дискретної його моделей були проведені експериментальні дослідження на вимушені коливання колії.

В точці контакту рейки та рухомого колеса, взаємодія, зосереджена в цій точці, приведена маса колії, дія якої на коливальну систему «ко-

лія-колесо» еквівалентна дії розподілених мас колії на більшій довжині. В більш точних розрахункових схемах приведена маса колії представлена розподіленою за протяжністю колії.

При приведенні маси колії до точки контакту рухомого колеса зазвичай використовують розрахункову схему з розподіленими параметрами або лінійчатую схему взаємодії колії та рухомого складу. При використанні такого роду розрахункових схем виникають питання. А саме, як правильно визначити приведену масу колії та до якого колеса екіпажу приєднувати однакові приведені маси колії, таким чином чи можна вважати, що величина приведеної маси колії не залежить від силових процесів на сусі-

дніх з ним колесах. Але це визначення приведеної маси колії незадовільно тому, що дозволяє за значення приведеної маси прийняти будь-яке число і при цьому дія її виявиться еквівалентною дією на колесо розподілених мас колії, якщо підібрати відповідні прискорення.

Деякі дослідники (Веріго, & Коган, 1986; Даніленко, & Рибкін, 2006; Ершов, & Митин, 1989; Коншин, 1968) намагались визначити значення приведеної маси, зосередженої в точці контакту колеса та рейки зі значень розподіленої маси колії. Ці спроби були засновані на використанні методу Релея. Так К. М. Шмідт (1941) визначив приведену до контакту з колесом масу колії як суму приведених до цього контакту мас рейко-шпальної решітки, баластового шару та ґрунту земляного полотна. К. М. Шмідт виходив з того, що кінетична енергія зосередженої в точці контакту рейки з колесом приведеної маси колії на довжині деформованої рейки.

При визначенні приведеної маси ґрунту можна скористатися приблизною оцінкою, яка бере участь в коливаннях маси ґрунту по замірах динамічних напружень в земляному полотні. Г. Г. Коншин (1968) запропонував апроксимувати розподілення напружень в земляному полотні на відстані від підшви рейки.

Експериментальними даними Г. Г. Коншина (1968) та А. І. Гасанова (1968) визначено для $V=100$ км/год значення приведеної маси колії для колії з рейками типу Р50 на дерев'яних шпалах (1840 шт/км) та щебеневому баласті ($h=45$ см) та для такої ж колії, але з залізобетонними шпалами при товщині баластного шару 50 см. Воно виявилось в першому випадку 1271 кг, а в другому 1438 кг.

Очевидно, що найбільш точно визначення приведеної маси колії можливе лише експериментальними методами. Але експериментальне неперивне вимірювання вертикальних прискорень рухомої точки контакту колеса та рейки через нерівності та, особливо, мікронерівності на їх контакт практично неможливе. Тому в більшості відомих на теперішній час дослідженнях (Baluch, 1978; Hegian, & Aniołek, 2011; Даніленко, 2010; Першин, 1996) використовується експериментальний метод, в якому приведена маса визначається за вимірами вертикальних прискорень в деяких фіксованих поперечних перерізах рейки при переході через ці перерізи коліс рухомого складу, а саме в нерухомій системі координат.

© Я. С. Лейбук, О. О. Скорик, Н. О. Муригіна, А. С. Зверева, 2019

Мета

Метою роботи є вирішення науково-практичної задачі підвищення точності розрахунків взаємодії колії та рухомого складу.

Методика

Для магістральних колій, необхідно визначити вплив сил інерції у вертикальній площині. Для встановлення цієї величини необхідно знайти приведену масу колії, для чого проведено експеримент в польових умовах, за допомогою динамічного стабілізатора колії. Були задані дві частоти роботи 10 та 27 Гц. При яких були зроблені заміри прискорень колії за допомогою акселерометра, який був розміщений на шийці рейки. Згодом були побудовані графіки прискорень колій, в залежності від заданої частоти та відстані до динамічного навантаження.

Результати

Для визначення інерційних та дисипативних характеристик колії для континуальної та дискретної його моделей були проведені експериментальні дослідження на вимушені коливання колії. Були взяті до уваги попередні дослідження Г. П. Бурчака та М. В. Вольнова (1976), які використовували для збудження вимушених коливань вібраційну машину конструкції НДІ мостів ЛШЗТу.

В нашому експерименті в якості збудника вимушених коливань використовувався динамічний стабілізатор колії ДСП-С4. Під час дослідження на підшві рейки Р65 встановлювався акселерометр (рис. 1), для визначення прискорень колії.



Рис.1. Акселерометр на підшві рейки Р65

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Динамічний стабілізатор починав свій рух за 50 м до точки замірів з робочою швидкістю 5 км/год та встановленою частотою 10 Гц, що є рівнозначною для пасажирського потягу, який рухається зі швидкістю 80 км/год.

Під час експерименту виконувались два рази заміри при частоті 10 Гц та один раз при частоті 27 Гц. Потім при отриманні результатів були побудовані графіки залежностей прискорень колії від часу при різних частотах (рис. 2-4). Обробка отриманих в результаті проведення експериментальних досліджень полягала в тому, що визначались величини амплітуд прискорень рейок та їх частоти.

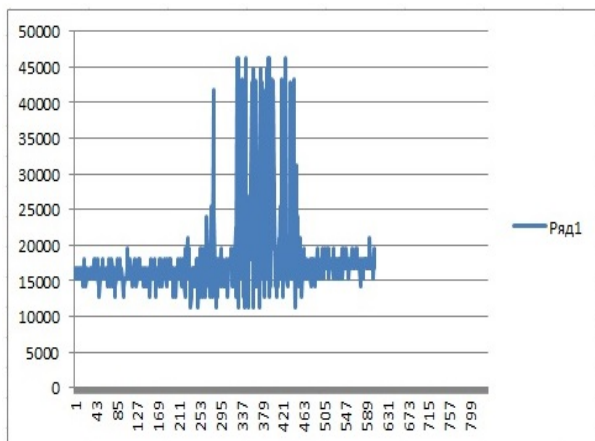


Рис. 2. Графік залежностей прискорень колії від часу при частоті 10 Гц (перше вимірювання)

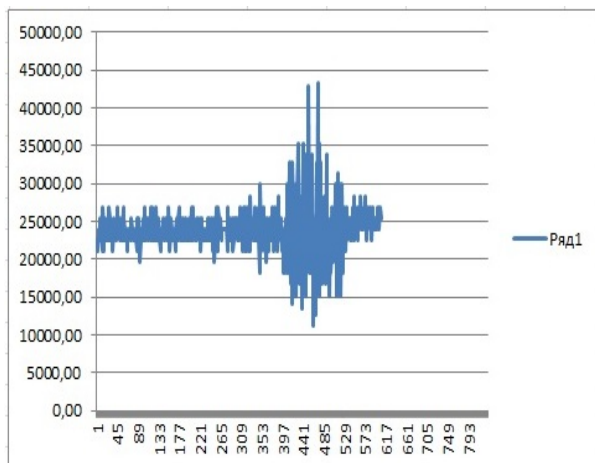


Рис. 3. Графік залежностей прискорень колії від часу при частоті 10 Гц (друге вимірювання)

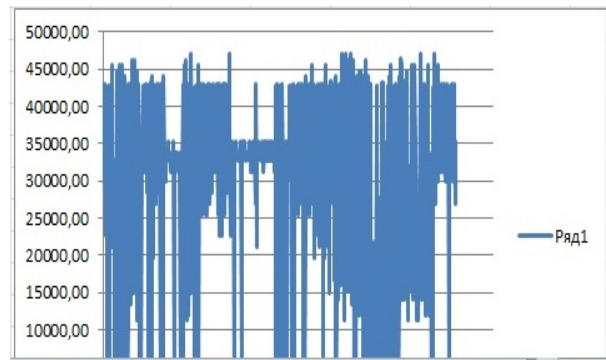


Рис. 4. Графік залежностей прискорень колії від часу при частоті 27 Гц

Як видно з рисунків 2-4, отримані за допомогою експерименту симетричної системи значення величини, можуть бути використані в якості початкового наближення до системи з кутовими коливаннями. В якості першого приближення враховано, що значення розподілених мас, коефіцієнтів дисипації та модулів пружності рівні для рейкових ниток і дорівнюють половині відповідних величин, які визначаються для симетричної системи. Значення ексцентриситету та радіусу інерції орієнтовно відомі з умов проведення експерименту. При цьому система вводилась в резонанс, що підвищує достовірність отриманих значень приведенної маси та коефіцієнту дисипації.

Використовуючи цей розрахунковий апарат та експериментальні дані Г. Г. Коншина (1968) та А. І. Гасанова (1968), визначено для $V=100$ км/год значення приведенної маси колії для колії з рейками типу Р65 на залізобетонних шпалах (1840 шт/км) та щебеневому баласті ($h=50$ см). Воно виявилось в першому випадку 1271 кг, а в другому 1438 кг.

Очевидно, що найбільш точно визначення приведенної маси колії можливе лише експериментальними методами. Але експериментальне неперервне вимірювання вертикальних прискорень рухомої точки контакту колеса та рейки через нерівності та особливо мікронерівності на їх контакт практично неможливо. Тому в більшості відомих на теперішній час дослідженнях використовується експериментальний метод (Даніленко, 2010), в якому приведена маса m_{II}^{0*} визначається за вимірами вертикальних прискорень w_{II}^{0*} в деяких фіксованих поперечних перерізах рейки при переході через ці перерізи коліс рухомого складу, а саме в нерухомій системі координат (2):

$$w_{\Pi}^{0*} = \left[\frac{d^2 z^0(x, t)}{dt^2} \right]_{x=x_0}. \quad (1)$$

Можемо побачити, що w_{Π}^{0*} та w_{Π}^0 відрізняються. Якщо уявити собі, що ідеально кругле колесо котиться по ідеально прямолинійній горизонтальній рейці з постійної по довжині колії та в часі і не рівній безкінечності жорсткості колії, то точка контакту колеса та рейки буде рухатись по горизонтальній прямій та w_{Π}^0 буде дорівнювати нулю. В тих же умовах прискорення w_{Π}^{0*} , виміряні в деяким фіксованим перерізі колії, при проході по ньому того ж колеса будуть суттєво відрізнятися від нуля. w_{Π}^{0*} та w_{Π}^0 будуть співпадати лише в тому випадку, коли v – швидкість поступового руху перемінного навантаження $Q(t)$ буде дорівнювати нулю, так як в цьому випадку в виразі (2).

Для випадку, коли змінне в часі навантаження просувається зі швидкістю $v \neq 0$, приведена маса колії може бути визначена з умови рівності інерційних сил, які передаються рейкою колесу, з рівняння:

$$m_{\Pi}^0 = m_{\Pi}^{0*} \frac{\left[\frac{d^2 z^0(x, t)}{dt^2} \right]_{x=x_0}}{\frac{d^2 z^0(x_0, t)}{dt^2}}, \quad (2)$$

де m_{Π}^{0*} – маса, яка визначається в нерухомій системі координат.

Оскільки $z^0(x, t)$ та $z^0(x_0, t)$ це функції часу, то залежать від динамічної сили $Q(t)$, яку сприймає рейка, то очевидно, що без знання цих функцій неможливо визначити співвідношення m_{Π}^{0*} та m_{Π}^0 . З цього є важливий висновок, що при експериментальному визначенні m_{Π}^{0*} за прискореннями в фіксованій точці колії m_{Π}^{0*} неможна вважати величиною, постійною в часі.

Наукова новизна та практична значимість

Оскільки частоти збурювальних сил під кожним колесом екіпажа різні, а коливання елементів верхньої будови колії залежать від збурювальних сил, викликаних не одним колесом,

а сукупністю розташованих коліс, то прийняття в лінійних розрахункових схемах припущення про наявність під кожним колесом своїх «незалежних» та рівних за значеннями приведених мас прийнятно, лише для отримання приблизних результатів розрахунків.

Висновки

В результаті досліджень знайдено методику визначення приведеної маси ґрунту, який бере участь в коливаннях по замірах динамічних напружень в земляному полотні експериментальним методом. У дослідженні було використано динамічний стабілізатор ДСП-С4 на магістральній колії. Були задані дві частоти роботи, які дорівнюють динамічним коливанням від рухомого складу потяга. Під час дослідження були зроблені заміри прискорень колії за допомогою акселерометра, який був розміщений на шийці рейки. Згодом були побудовані графіки прискорень колій, в залежності від заданої частоти та відстані до динамічного навантаження.

Розроблена методика визначення інерційних та дисипативних характеристик дискретної моделі колії на вимушені коливання. При цьому система вводилась в резонанс, що підвищує достовірність отриманих значень приведеної маси та коефіцієнту дисипації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Baluch, H. (1978). *Diagnostyka nawierzchni kolejowej*. Warszawa: Wydawnictwa komunikacji i łączności.
- Herian, J., & Aniolek, K. (2011). Modelling of structure and properties of pearlitic steel and abrasive wear of the turnout frog in the cyclic loading conditions. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 49(1), 71-81.
- Бурчак, Г. П., & Вольнов, М. В. (1976). Определение инерционных и диссипативных характеристик пути из опыта на вынужденном колебании. *Труды МИИТ*, 542, 43-68.
- Вериго, М. Ф., & Коган, А. Я. (1986). *Взаимодействие пути и подвижного состава*. Москва: Транспорт.
- Гасанов, А. И. (1968). О приведенной массе пути. *Вестник ВНИИЖТ*, 6, 52-53.
- Даніленко, Е. І., & Рибкін, В. В. (2006). *Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість*. Київ: Транспорт України.
- Даніленко, Е. І. (2010). *Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомих складом* (Т. 2). Київ: Інпрес.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Ершов, О. П., & Митин, Н. Ф. (1989). *Динамическая оценка отступлений в содержании железнодорожного пути и дальнейшее ее совершенствование*. Москва: Транспорт.
- Коншин Г. Г. (1968). Работа пути с железобетонными шпалами под нагрузкой. *Труды МИИТ*, 178, 20-59.
- Першин, С. П. (1996). Вертикальные жесткости пути и его надежность. *Путь и путевое хозяйство*, 6, 8-10.
- Шмидт, К. М. (1941). Влияние массы пути на деформацию его при ударе колеса с подрессоренным грузом. *Сб. НИИ пути*, 1941, 87-109.

Я. С. ЛЕЙБУК¹, А. А. СКОРИК², Н. А. МУРЫГИНА³, А. С. ЗВЕРЕВА^{4*}

¹ Кафедра «Путь и путевое хозяйство» Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, эл. почта leibuk@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-1810-0910

² Кафедра «Путь и путевое хозяйство» Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, эл. почта s.a.0317@ukr.net, ORCID 0000-0002-0943-7482

³ Кафедра «Путь и путевое хозяйство» Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, эл. почта murygina@kart.edu.ua

^{4*} Кафедра «Путь и путевое хозяйство» Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, эл. почта farwww@ukr.net, ORCID 0000-0002-4832-3760

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОЙ МАССЫ ПУТИ

Цель работы состоит в определении приведенной массы грунта, который участвует в колебаниях по замерам динамических напряжений в земляном полотне. **Методика.** В исследовании был использован динамический стабилизатор пути ДСП-С4 на магистральном пути. Заданы две частоты работы, которые равны динамическим колебаниям от подвижного состава поезда. В ходе исследования были сделаны замеры ускорений пути с помощью акселерометра, который был размещен на подошве рельса. **Результаты.** Впоследствии были построены графики ускорений пути, в зависимости от заданной частоты и расстояния до динамической нагрузки. Для магистральных путей необходимо определить влияние сил инерции в вертикальной плоскости. Для установления этого значения необходимо найти заданную массу пути, для этого был проведен эксперимент в полевых условиях с использованием динамический стабилизатор пути. Были заданы две частотные характеристики 10 и 27 Гц. Измерения ускорения скорости проводились с использованием акселерометра, который был размещен на шейке рельса. Впоследствии были построены графики ускорения путей в зависимости от заданной частоты и расстояния до динамической нагрузки. Для определения инерционных и диссипативных характеристик пути для континуальной и дискретной моделей были проведены экспериментальные исследования на вынужденные колебания пути. При этом система вводилась в резонанс, что повышает достоверность полученных результатов значений приведенной массы и коэффициента диссипации. В большинстве известных в настоящее время исследований используется экспериментальный метод, в котором заданную массу определяют путем измерения вертикальных ускорений в некоторых фиксированных поперечных сечениях рельса при прохождении через эти сечения колес подвижного состава, а именно в фиксированной системе координат. **Научная новизна.** При определении инерционных и диссипативных характеристик пути в качестве возбудителя вынужденных колебаний использовано динамический стабилизатор пути ДСП-С4, при прохождении которого моделировался движение пассажирского поезда. **Практическая значимость** заключается в том, что была разработана методика определения инерционных и диссипативных характеристик пути на вынужденные колебания.

Ключевые слова: железнодорожный путь; динамический стабилизатор; приведенная масса пути; численные исследования

Y. S. LEIBUK¹, A. A. SCORYK², N. A. MURYGINA³, A. S. ZVIERIEVA^{4*}

¹ Department «Track and track facilities» of Ukrainian State University of Railway, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 59, e-mail leibuk@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-1810-0910

² Department «Track and track facilities» of Ukrainian State University of Railway, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 59, e-mail s.a.0317@ukr.net, ORCID 0000-0002-0943-7482

© Я. С. Лейбук, О. О. Скорик, Н. О. Муригина, А. С. Зверева, 2019

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ARRAYED MASS OF THE TRACK

The purpose of the work is to determine the reduced mass of soil, which participates in fluctuations in measurements of dynamic stresses in the earth's canvas. **Methodology.** In the study, the dynamic stabilizer of the DSP-S4 track on the main track was used. Two work frequencies were given, which are equal to the dynamic fluctuations of the rolling stock of the train. During the study, measurements of acceleration of the track were made using an accelerometer, which was placed on the sole of the rails. **Findings.** Subsequently, graphs of acceleration of the tracks were constructed, depending on the given frequency and the distance to the dynamic load. For trunk tracks, it is necessary to determine the effect of the forces of inertia in the vertical plane. To establish this value, we need to find the given mass of the track, which is why we conducted an experiment in the field, using a dynamic track stabilizer. Two frequency frequencies of 10 and 27 Hz were given, during which measurements of speed accelerations were made using an accelerometer which was placed on the neck of the rail. Subsequently, graphs of acceleration of the tracks were constructed, depending on the given frequency and the distance to the dynamic load. The method of determining the inertial and dissipative characteristics of the discrete model of the path for forced oscillations was also determined. At the same time, the system was introduced into a resonance, which increases the reliability of the obtained values of the reduced mass and the dissipation coefficient. In the majority of the currently known studies an experimental method is used in which the given mass is determined by measurements of vertical accelerations in some fixed cross-sectional sections of the rail during the transition through these sections of the wheels of the rolling stock, namely, in a fixed coordinate system. **Originality.** In determining the inertial and dissipative characteristics of the track, the dynamic stabilizer of the DSP-S4 path was used as the causative agent of forced oscillations, during the passage of which the motion of the passenger train was simulated. **Practical value** lies in the fact that a technique was developed for determining the inertial and dissipative characteristics of the path to forced oscillations.

Keywords: railroad track; dynamic stabilizer; driven track mass; numerical studies

REFERENCES

- Baluch, H. (1978). *Diagnostyka nawierzchni kolejowej*. Warszawa: Wydawnictwa komunikacji i łączności.
- Herian, J., & Aniolek, K. (2011). Modelling of structure and properties of pearlitic steel and abrasive wear of the turnout frog in the cyclic loading conditions. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 49(1), 71-81. (in English)
- Burchak, G. P., & Vol'nov, M. V. (1976). Opredelenie inercionnyh i dissipativnyh harakteristik puti iz opyta na vyzhdennom kolebanii. *Trudy MIIT*, 542, 43-68. (in Russian)
- Verigo, M. F., & Kogan, A. Ja. (1986). *Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava*. Moskva: Transport. (in Russian)
- Gasanov, A. I. (1968). O privedennoj masse puti. *Vestnik VNIIZhT*, 6, 52-53. (in Russian)
- Danilenko, E. I., & Rybkin, V. V. (2006). *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist*. Kyiv: Transport Ukrainy. (in Ukrainian)
- Danilenko, E. I. (2010). *Zaliznychna kolii. Ulashtuvannia, proektuvannia i rozrakhunky, vzaiemodiia z rukhomym skladom (T. 2)*. Kyiv: Inpres. (in Ukrainian)
- Ershov, O. P., & Mitin, N. F. (1989). *Dinamicheskaja ocenka otstupenij v sodержanii zheleznodorozhnogo puti i dal'nejshee ee sovershenstvovanie*. Moskva: Transport. (in Russian)
- Konshin G. G. (1968). Rabota puti s zhelezobetonnyimi shpalami pod nagruzkoy. *Trudy MIIT*, 178, 20-59. (in Russian)
- Pershin, S. P. (1996). Vertikal'nye zhestkosti puti i ego nadezhnost'. *Put' i putevoe hozjajstvo*, 6, 8-10. (in Russian)
- Shmidt, K. M. (1941). Vlijanie massy puti na deformaciju ego pri udare koleasa s podressorennyim gruzom. *Sb. NII puti, 1941*, 87-109. (in Russian)

Надійшла до редколегії 31.05.2019

Прийнята до друку 07.06.2019

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 004:622.272/.82

І. В. МЯСНИКОВ^{1*}, С. М. ГАПЄЄВ², М. О. ВИГОДІН³

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

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

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

ВИПРОБУВАННЯ МІЖРАМНИХ ОГОРОДЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Мета. Підвищення ефективності роботи вугільних шахт є одним із ключових завдань науки та техніки у галузі. Одним із шляхів вирішення цього питання є зменшення витрат на підтримання та ремонт гірничих виробок, а використання сучасних програмних комплексів дозволяє конструювати новітні системи кріплення, та перевіряти їх окремі елементи при різних навантаженнях. Метою даного дослідження є порівняння граничних значень міцності різних типів міжрамних огороджень за допомогою комп'ютерного моделювання. **Методика.** Для одержання поставленої мети на основі аналізу, щодо силового впливу гірничого тиску на міжрамне огородження, у програмному комплексі SCAD Office 21.1.9.3 (Арбат), були змодельовані чотири варіанти міжрамних огороджень: звичайна залізобетонна плита з діаметром проволочки – 4 і 5 мм та просторове гратчасте з діаметром проволочки – 3 і 4 мм, на які було змодельоване навантаження у 1; 1,5; 2; 2,5 т/м².

Результати. На основі даних досліджень були отримані величини згинаючого моменту від сумарно розподіленого навантаження на переріз міжрамного огородження, які виражені у вигляді коефіцієнтів використання перерізу, що свідчать про виникаючі напруження у залізобетонній конструкції під дією різних величин навантаження, та побудована відповідна діаграма. **Наукова новизна.** Запроваджено спосіб комп'ютерного моделювання на основі якого можливо проводити моделювання шахтних міжрамних огороджень. **Практична значимість.** Запропонований спосіб комп'ютерного моделювання, за допомогою якого можливе випробування шахтних міжрамних огороджень та варіюванням основних параметрів яких можливо підібрати найвигідніший варіант.

Ключові слова: міжрамне огородження; гірниче кріплення; несуча здатність; капітальні виробки; комбіноване кріплення; комп'ютерне моделювання

Вступ

Удосконалення технологічних процесів та застосування нових енергозберігаючих матеріалів є основними завданнями прогресу не тільки в гірничій справі, а й у всіх галузях господарської діяльності. Застосування інноваційних рішень в гірничій справі при спорудженні гірничих виробок сприяє зниженню вартості видобутої корисної копалини, а також підвищенню продуктивності праці. Зокрема, це також стосується зведення кріплення гірничих виробок і їх підтримки у стійкому стані (Хоменчук, Борщевский, & Гончаренко, 2012).

Вибір способів та засобів забезпечення стійкості виробок повинен бути заснований на особливостях розвитку геомеханічних процесів при веденні гірничопрохідницьких робіт. Дос-

від експлуатації глибоких шахт показує, що найбільший ефект у підвищенні стійкості виробок дають заходи по створенню взаємодії системи «кріплення-масив» (рис. 1).

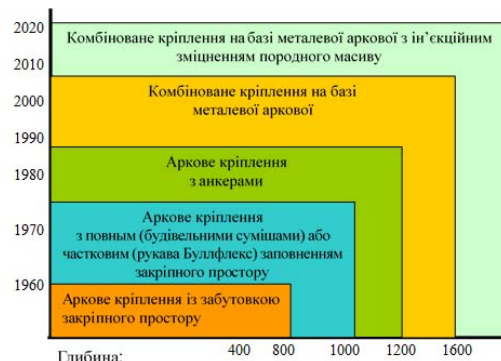


Рис. 1. Розвиток систем кріплення із зростаючою глибиною розробки (по Хоменчуку, Борщевському, & Гончаренко, 2012)

Такі конструкції використовують можливість 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 (Sdvyzhkova, Babets, Kravchenko, & Smirnov, 2016; Tereshchuk, Khoziaikina, & Babets, 2018; Айкхофф, 2008). Одним з видів кріплення, яке здатне реалізувати це, є кріплення типу АСН-А (рис. 2).

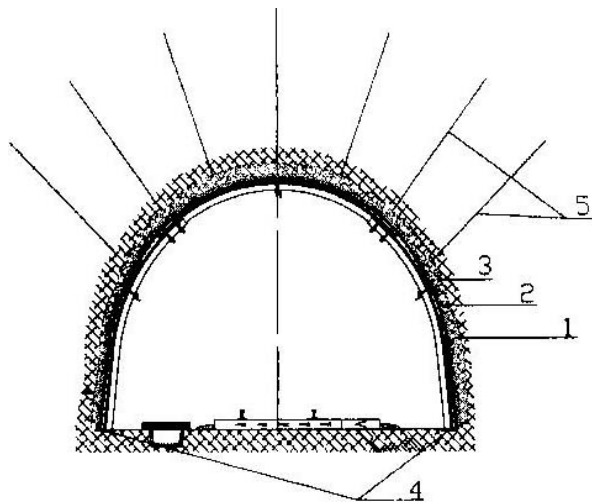


Рис. 2. Конструкція кріплення АСН-А (арка+сітка+набризк+анкер):

- 1 – перший шар набризкбетону (вископластичний, піддавлений), 2 – другий шар набризкбетону (жорсткий, несучий), 3 – металеве сітчасте міжрамне огородження, 4 – підп'ятники, 5 – анкера

Необхідне в цьому випадку ретельне заповнення дрібною породою закріпного простору як правило не виконується, оскільки являє собою трудомістку, немеханізовану операцію, а виконані дослідження (Максимов, Шашенко, & Ренко, 1987) показали, що за відсутністю контакту кріплення з матеріалом порідного заповнення у секторі 40...60 °С (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 (Сторчак, Халимендик А. В., Пустовой, & Халимендик Ал. В., 2013).

Попередити руйнування приконтурного ма-

сиву 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 (Sdvyzhkova, Babets, Kravchenko, & Smirnov, 2016).

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 (Solodyankin, Hryhoriev, Dudka, & Mashurka, 2017). В даний час існує цілий ряд рішень, що дозволяють забезпечувати стійкість капітальних виробок. Однак в кожному конкретному випадку необхідно враховувати специфіку геомеханічних умов, що передбачають проведення відповідного комплексу досліджень (Солодянкин, Гапеев, & Выгодин, 2016).

Крім того, надійність і безпека гірничих виробок також багато в чому забезпечується працездатністю міжрамних огорожень (затяжок). Незважаючи на велику кількість їх типів, у вітчизняній промисловості знайшли широке застосування лише дерев'яні та плоскі залізобетонні конструкції. Низька працездатність і масові відмови затяжок вимагають перегляду практики їх проектування. Однак до теперішнього часу механізм взаємодії затяжок з масивом гірських порід трактується спрощено, характер розподілу навантаження на міжрамні огорожі недостатньо вивчений (Solodyankin, Hryhoriev, Dudka, & Mashurka, 2017).

Мета дослідження

Метою досліджень є знаходження граничних значень міцності міжрамних огорожень за допомогою комп'ютерного моделювання.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Методика дослідження

Момент переходу комбінованої системи в жорсткий режим роботи залежить від конструктивних характеристик рам кріплення, кількості анкерів, які регулюватимуть переміщення контуру, а також час затвердіння цементно-піщаної суміші та її міцнісних властивостей. Пропорційна зсувам зовнішнє навантаження регулюється щільністю анкерного кріплення і передається на шар цементно-піщаної суміші, а потім безпосередньо на металеву раму і зтяжку. Таким чином, визначення жорсткості кріплення може бути зведено до визначення жорсткості металевих рам, яка розраховується за формулою:

$$G = \frac{U_{кр}}{q_{кр}}, \quad (1)$$

де: $U_{кр}$ – переміщення контуру виробки, м;
 $q_{кр}$ – нагрузка на кріплення, т.

У свою чергу, рамне кріплення може вважатися жорстким, коли воно вичерпало свою конструктивну піддатливість, яка в більшості найбільш поширених конструкцій 3-х ланкових кріплень знаходиться в межах 300...400 мм.

Виходячи з того, що навантаження на кріплення, а, як наслідок, і переміщення контуру виробки, збільшуються з часом, перехід кріплення в жорсткий режим роботи можна розглядати як функцію, яка залежить від часу T :

$$q = f(T). \quad (2)$$

Переміщення контуру U_k – функція, що залежить від умов розробки, і, як було сказано вище, від часу, може бути розрахована за формулою (Шашенко, Солодянкін, & Смирнов, 2015):

$$U_k = f\left(\frac{R_c k_c}{\gamma H}, T\right), \quad (3)$$

де: $\frac{R_c k_c}{\gamma H}$ – геомеханічний показник умов розробки; R_c – межа міцності на одновісний стиск, МПа; k_c – коефіцієнт структурно-механічного ослаблення масиву; γ – об'ємна вага порід; H – глибина розташування виробки, м.

У складних гірничо-геологічних умовах поряд з рамним кріпленням прийнято встановлювати анкерне кріплення, яке в залежності від кількості анкерних болтів, може зменшити ве-

личину зсуву (розтягнути в часі момент досягнення максимальних переміщень) або повністю зупинити переміщення контуру виробки до того, як рами кріплення вичерпають свою можливу піддатливість. Схожим чином буде працювати і шар цементно-піщаної розчину, який, в залежності від характеристик цементу, з часом набере свою міцність і тим самим посилить загальну систему кріплення.

Міжрамне огородження, як частина комбінованого кріплення, таким же чином буде піддано впливу зовнішнього навантаження. Тому воно може бути розглянуте як плита, що вільно лежить на пружній основі та завантажена розподіленим навантаженням (Цвей, 2014). Цією основою в даній ситуації можна вважати рами кріплення до того, як вони вичерпають свою функцію піддатливості і перейдуть в жорсткий режим роботи.

Оскільки, саме по собі міжрамне огородження не може нести великі навантаження і часто виконує лише функцію опалубки, то при цьому виникає необхідність підібрати такі його конструктивні параметри, при яких можлива ефективна спільна робота зтяжки з рамами кріплення і повинні забезпечуватися високі техніко-економічні показники як при експлуатації виробок, так і при їх проведенні:

$$G_{зат} = G_{кр}, \quad (4)$$

де: $G_{зат}$ – жорсткість міжрамного огородження;
 $G_{кр}$ – жорсткість рам кріплення.

Основними вимогами, при яких дотримуються високі техніко-економічні показники, є наступні:

1) міжрамне огородження повинне мати необхідну несучу здатність і піддатливість для того, щоб охопити весь діапазон можливих умов експлуатації кріплень;

2) огородження повинне бути безпечними при транспортуванні і установці, а також забезпечувати рівень безпеки протягом усього терміну експлуатації;

3) геометричні розміри огорожі повинні забезпечувати їх пристосованість до різних форм поперечного перерізу виробок, а також кроків встановлення рам кріплення.

Подібним вимогам відповідають конструкції міжрамних огорожень на основі об'ємних ґратчастих конструкцій (Мясников, Гапєєв, Вигодін, & Прокудін, 2018).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Варіювання основними параметрами металевого ґратчастого огороження (діаметр прутків, відстань між ними, конфігурація і крок зигзагоподібних елементів, їх орієнтація щодо осі виробки) дозволять визначити параметри об'ємної конструкції.

Таким чином, за допомогою програмного комплексу SCAD (Арбат) були змодельовані чотири види міжрамних огорожень (табл. 1):

– звичайна з/б плита з діаметром проволочки 4 мм (далі – з/б 4 мм);

– з/б плита з діаметром проволочки 4 мм (далі – з/б 5 мм);

– просторова ґратчаста з діаметром проволочки 3 мм (далі – 3 мм);

– просторова ґратчаста з діаметром проволочки 4 мм (далі – 4 мм).

Результати досліджень

На основі даних досліджень були отримані величини згинаючого моменту від сумарно розподіленого навантаження на переріз міжрамного огороження (табл. 2).

Таблиця 1

Характеристики змодельованих огорожень

Найменування характеристики	з/б 4 та 5 мм	3 мм	4 мм
Довжина, мм	1000	1000	1160
Ширина, мм	200	350	450
Товщина, мм	50	30	50
Крок встановлювання поперечних прутків, мм	240	150	160
Крок встановлювання повздовжніх прутків, мм	85	80	100
Крок встановлення хвиль, мм	–	150	160
Клас бетону	B25	B25	B25

Таблиця 2

Результати дослідження навантаження на міжрамні огороження

	Навантаження, т/м ²	3 мм	4 мм	4 мм з/б	5 мм з/б
Величини згинаючого моменту від сумарно розподіленого навантаження	1	0,555	0,456	0,804	0,533
	1,5	0,788	0,647	1,14	0,757
	2	1,121	0,839	–	0,98
	2,5	–	1,03	–	1,204

Ці величини виражені у вигляді коефіцієнтів використання перерізу (згідно ДБН В.1.1-12:2014), що свідчать про виникаючі напруження у залізобетонній конструкції під дією різних величин навантаження, та побудована відповідна залежність (рис. 3). На даній діаграмі пунктирна лінія означає, що при досягненні напруженнями під дією навантаження значення «1», переріз міжрамного огороження вичерпав свою конструктивну здатність сприймати навантаження, і вийшов з ладу.

За даними досліджень можливо побачити, що переріз стандартного залізобетонного огороження з діаметром проволочки 4 мм має найнижчі показники згинаючого моменту – він вийде з ладу вже при навантаженні до 2 т/м². Найвищі показники – майже 2,5 т/м² у ґратчастого огороження об'ємної конструкції з діаметром проволочки 4 мм.

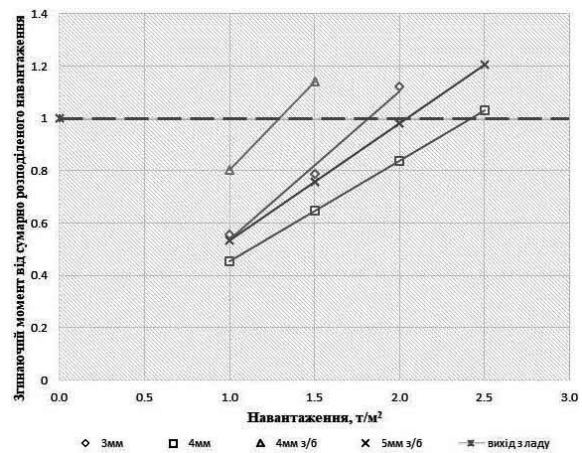


Рис. 3 Діаграма навантаження на міжрамні огороження

Аналізуючи дані, можна сказати, що ґратчасте огороження об'ємної конструкції має

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

більшу несучу здатність і тому застосування огорожень такого типу позитивно вплине на несучу здатність всього гірничого кріплення. Слід взяти до уваги результати економічних розрахунків (Гапєєв, Вигодін, & Мясников, 2018), згідно з якими використання такого типу огороження дозволяє отримати економію близько 6 тис. грн. на кожен пог. м виробки.

Наукова новизна та практична значимість

Запроваджено спосіб комп'ютерного моделювання на основі якого можливо проводити моделювання шахтних міжрамних огорожень.

Запропонований спосіб комп'ютерного моделювання, за допомогою якого можливе випробування шахтних міжрамних огорожень та варіюванням основних параметрів яких можливо підібрати найвигідніший варіант.

Висновки

Підвищення ефективності роботи вугільної галузі є одним із ключових завдань, передбачених проектом Енергетичної стратегії до 2035 року та прописаних у Концепції реформування і розвитку вугільної промисловості України. Впровадження реформ на основі найкращих практик та досвіду європейських країн, найновіших наукових розробок і технологій допоможе здійснити реструктуризацію вугільної промисловості, модернізацію виробничих процесів та удосконалити систему управління вугільними шахтами (Тенденции и перспективы добычи, использования угля в Украине и мире, 2017).

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.

Використання сучасних програмних комплексів дозволяє конструювати новітні системи кріплення, і перевіряти їх окремі елементи при різних навантаженнях, що й було продемонстровано у даній статті. Отримані результати підтвердили ефективність металевих гратчас-

того огороження просторової конструкції, у порівнянні зі звичайними з/б плитами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Sdvyzhkova, O. O., Babets, D. V., Kravchenko, K. V., & 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, 34-42.
- Solodyankin, O. V., Hryhoriev, O. Y., Dudka, I. V., & 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, 19-27.
- Tereshchuk, R. M., Khoziaikina, N. V., & Babets, D. V. (2018). Substantiation of rational roof-bolting parameters. *Scientific bulletin of National Mining University*, 1, 19-26.
- Айкхофф, Ю. (2008). Техника и технология анкерного крепления в системе штрековой крепи. *Глюкауф*, 2(3), 28-35.
- Гапєєв, С. М., Вигодін, М. О. & Мясников, І. В. (2018). *Обґрунтування економічної доцільності застосування міжрамної огорожі підвищеної несучої здатності*. Матеріали конференції «Проблеми геотехніки та підземної урбаністики», Київ.
- Литвинський, Г. Г., Малєєв, Г. Л., Гайко, М.Л., & Волошин, В. Б. (2000). *Міжрамні огорожі шахтного кріплення*. Алчевськ: ДГМІ.
- Максимов, А. П., Шашенко, А. Н., & Роечко, А. Н. (1987). Влияние качества забутовки на несущую способность металлической арочной крепи. *Шахтное строительство*, 3, 9-12.
- Мясников, І. В., Гапєєв, С. М., Вигодін, М. О., & Прокудін, О. З. (2018). Нові типи міжрамного огороження для підвищення несучої здатності кріплення капітальних виробок. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 13, 67-174.
- Солодянкин, А. В., Гапєєв, С. Н., & Выгодин, М. А. (2016). *Эффективные способы поддержания выработок в сложных условиях шахт Западного Донбасса*. Матеріали конференції «Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва». Кременчуг.
- Сторчак, Г. Г., Халимендик, А. В., Пустовой, В. В., & Халимендик, Ал. В. (2013). Пути обеспечения длительной устойчивости протяженных горных выработок в условиях несимметричных нагрузок при использовании рамной крепи. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*, 2(11), 157-166.
- Тенденции и перспективы добычи, использования угля в Украине и мире (2017). *Уголь Украины*, 5-6, 72-73.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Хоменчук, О. В., Борщевский, С. В., & Гончаренко, В. В. (2012). Возведение набрызббетонной крепи взрывом. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 1, 115-119.
- Шашенко, О. М., Солодянкін, О. В., & Смирнов, О. В. (2015). *Здимання порід підосви виробок вугільних шахт*. Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес».
- Цвей, А. Ю. (2014). *Балки и плиты на упругом основании. Лекции с примерами расчета по специальному курсу строительной механики*. Москва: МАДИ.

И. В. МЯСНИКОВ^{1*}, С. Н. ГАПЕЕВ², М. А. ВЫГОДИН³

^{1*} Кафедра строительства, геотехники и геомеханики, НТУ «Днепропетровская политехника», пр. Д. Яворницкого 19, Днепр, Украина, 49005, тел. (095) 706 91 66, эл. почта miasnykov.i.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-7525-6196

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

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

ИСПЫТАНИЕ МЕЖРАМНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель. Повышение эффективности работы угольных шахт является одним из ключевых задач науки и техники в области. Одним из путей решения этого вопроса является уменьшение затрат на поддержание и ремонт горных выработок, а использование современных программных комплексов позволяет конструировать новые системы крепи, и проверять их отдельные элементы при различных нагрузках. Целью данного исследования является сравнение предельных значений прочности различных типов межрамных ограждений с помощью компьютерного моделирования. **Методика.** Для получения поставленной цели на основе анализа, силового воздействия горного давления на межрамное ограждение, в программном комплексе SCAD Office 21.1.9.3 (Арбат), были смоделированы четыре варианта межрамных ограждений: обычная железобетонная плита с диаметром проволоки – 4 и 5 мм и пространственное решетчатое с диаметром проволоки – 3 и 4 мм, на которые было смоделирована нагрузка в 1; 1,5; 2; 2,5 т/м². **Результаты.** На основе данных исследований были получены величины изгибающего момента от суммарно распределённой нагрузки на сечение межрамного ограждения, которые выражены в виде коэффициентов использования сечения, которые свидетельствуют о возникающих напряжениях в железобетонной конструкции под действием различных величин нагрузки, и построена соответствующая диаграмма. **Научная новизна.** Введен способ компьютерного моделирования на основе которого возможно проводить моделирование шахтных межрамных ограждений. **Практическая значимость.** Предложенный способ компьютерного моделирования, с помощью которого возможно испытание шахтных межрамных ограждений, и варьированием основными параметрами которых, можно подобрать самый выгодный вариант.

Ключевые слова: межрамное ограждение; горное крепление; несущая способность; капитальные выработки; комбинированная крепь; компьютерное моделирование

I. V. MYASNIKOV^{1*}, S. M. HAPIEIEV², M. O. VYGODIN³

^{1*} Department «Construction, geotechnics and geomechanics», NTU «Dnipro Polytechnic», pr. Dmytra Yavornytskoho 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. (095) 706 91 66, e-mail miasnykov.i.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-7525-6196

² Department «Construction, geotechnics and geomechanics», NTU «Dnipro Polytechnic», pr. Dmytra Yavornytskoho 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. (050) 362 04 47, e-mail hapieiev.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-0203-7424

³ Department «Construction, geotechnics and geomechanics», NTU «Dnipro Polytechnic», pr. Dmytra Yavornytskoho 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. (050) 361 07 19, e-mail referent@mlad.com.ua, ORCID 0000-0001-9069-543X

TEST OF INTERFRAME WALLS WITH COMPUTER SIMULATION

Purpose. Improving the efficiency of coal mines is one of the key tasks of science and technology in the industry. One of the ways to solve this issue is to reduce the cost of maintenance and repair of mine workings, and the use of modern software systems allows you to construct the newest types of mine support systems, and to check their individual elements at different loads. The purpose of this study is to compare the marginal strength values of different types of interframe walls using computer simulation. **Methodology.** For the purpose of achieving the objective

© I. V. Мясников, С. М. Гапеев, М. О. Вигодін, 2019

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

based on the analysis on the force influence of the rock pressure on the interframe walls, in the software complex SCAD Office 21.1.9.3 (Arbat), four variants of interframe walls were simulated: an ordinary reinforced concrete slab with a wire diameter of – 4 and 5 mm, and a spatial grating walls with wire diameter – 3 and 4 mm, on which the load was simulated in 1; 1,5; 2; 2,5 t/m². **Findings.** On the basis of these studies, the bending moment values from the total load distribution on the cross-section of the interframe walls enclosure, expressed in terms of cross-sectional ratios, indicating the resulting stresses in the reinforced concrete structure under the influence of different sizes of loading, were obtained, and a corresponding diagram was constructed. **Originality.** A method of computer simulation is introduced based on which it is possible to carry out the simulation of shaft interframe walls. **Practical value.** The proposed method of computer simulation, with the help of which it is possible to test mine interframe walls, and the variation of the basic parameters of which, can be taken advantage of the most favorable option.

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

REFERENCES

- Sdvyzhkova, O. O., Babets, D. V., Kravchenko, K. V., & 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, 34-42. (in English)
- Solodyankin, O. V., Hryhoriev, O. Y., Dudka, I. V., & 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, 19-27. (in English)
- Tereshchuk, R. M., Khoziaikina, N. V., & Babets, D. V. (2018). Substantiation of rational roof-bolting parameters. *Scientific bulletin of National Mining University*, 1, 19-26. (in English)
- Ajkhoff, Ju. (2008). Tehnika i tehnologija ankernogo krepjenja v sisteme shtrekovoj krepji. *Gljukauf*, 2(3), 28-35. (in Russian)
- Hapieiev, S. M., Vyhodin, M. O. & Miasnykov, I. V. (2018). *Obgruntuvannia ekonomichnoi dotsilnosti zastosuvannia mizhramnoi ohorozhi pidvyshchenoi nesuchoi zdatnosti*. Materialy konferentsii «Problemy heoinzhenerii ta pidzemnoi urbanistyky», Kyiv. (in Ukrainian)
- Lytvynskyi, H. H., Malieiev, H. L., Haiko, M.L., & Voloshyn, V. B. (2000). *Mizhramni ohorozhi shakhtnoho krip-lennia*. Alchevsk: DHMI. (in Ukrainian)
- Maksimov, A. P., Shashenko, A. N., & Roenko, A. N. (1987). Vlijanie kachestva zabutovki na nesushhuju sposobnost' metallicheskoj arochnoj krepji. *Shahtnoe stroitel'stvo*, 3, 9-12. (in Russian)
- Miasnykov, I. V., Hapieiev, S. M., Vyhodin, M. O., & Prokudin, O. Z. (2018). Novi typy mizhramnoho ohorodzhennia dla pidvyshchennia nesuchoi zdatnosti kriplennia kapitalnykh vyrobok. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 13, 67-174. (in Ukrainian)
- Solodjankin, A. V., Gapeev, S. N., & Vygodin, M. A. (2016). *Jeffektivnye sposoby podderzhaniya vyrabotok v slozhnyh uslovijah shaht Zapadnogo Donbassa*. Materialy konferentsii «Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnologii hirnychoho vyrobnytstva». Kremenchug. (in Russian)
- Storchak, G. G., Halimendik, A. V., Pustovoj, V. V., & Halimendik, Al. V. (2013). Puti obespechenija dli-tel'noj ustojchivosti protjazhennyh gornyh vyrabotok v uslovijah nesimmetrichnyh nagruzok pri ispol'zo-vanii ramnoj krepji. *Suchasni resursoenerhosberihaiuchi tekhnologii hirnychoho vyrobnytstva*, 2(11), 157-166. (in Russian)
- Tendencii i perspektivy dobychi, ispol'zovaniya uglja v Ukraine i mire (2017). *Ugol' Ukrainy*, 5-6, 72-73. (in Russian)
- Homenchuk, O. V., Borshhevskij, S. V., & Goncharenko, V. V. (2012). Vozvedenie nabryzbetonnoj krepji vzryvom. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 1, 115-119. (in Russian)
- Shashenko, O. M., Solodjankin, O. V., & Smyrnov, O. V. (2015). *Zdymannia porid pidoshvy vyrobok vuhilnykh shakht*. Dnipropetrovsk: TOV «LizunovPres». (in Ukrainian)
- Сvej, А. Ю. (2014). *Balki i plity na uprugom osnovanii. Lekcii s primerami rascheta po special'nomu kursu stroitel'noj mehaniki*. Moskva: MADI. (in Russian)

Надійшла до редколегії 06.05.2019

Прийнята до друку 14.05.2019

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.748.28:[624.012.35:624.035.4]

А. М. НЕТЕСА^{1*}, А. В. РАДКЕВИЧ²

^{1*} Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 769 25 51, ел. пошта andreynetes@meta.ua, ORCID 0000-0002-3364-3446

² Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (098) 307 81 44, ел. пошта anatolij.radkevich@gmail.com, ORCID 0000-0001-6325-8517

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ РІЗЬБОВОГО З'ЄДНАННЯ АРМАТУРИ ДЛЯ ЗБІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КАРКАСІВ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД

Метою наведених в статті результатів досліджень є визначення раціональних конструктивно-технологічних варіантів освоєння підземного простору, зокрема улаштування підземних паркінгів, у відношенні до способу з'єднання арматури збірних залізобетонних елементів. **Методика.** Вивчено передовий досвід будівництва аналогічних об'єктів на території України. Розглянуто варіанти з'єднання арматури ванношовним зварюванням та різьбовими муфтами. **Результати.** Визначені основні способи їх реалізації, встановлені найважливіші параметри ефективності способів зведення вертикальних несучих елементів. Підтверджено важливість реанімації будівельної галузі в області виготовлення вертикальних несучих елементів збірних каркасів будівель та споруд та їх адаптація до з'єднання за допомогою сучасних механічних способів з'єднання арматури. **Наукова новизна.** Встановлено, що одним з найбільш перспективних методів з'єднання арматури є механічне з'єднання різьбовими муфтами. Застосування його для з'єднання вертикальних несучих елементів збірних залізобетонних каркасів дозволяє скоротити термін монтажу елементів, зменшити кількість необхідного при виконанні робіт обладнання та значно прискорити процес улаштування несучих конструкцій. При об'єднанні з технологією виконання збірно-монолітного каркасу будівель можливе швидке та якісне зведення сучасних будівель ефективними індустріальними методами. **Практична значимість.** Вивчено досвід освоєння підземного простору в Україні та світі, визначено проблеми будівництва підземних споруд в специфічних складних гідрогеологічних умовах. Запропоновано ефективні технологічні варіанти улаштування вертикальних несучих елементів збірних та збірно-монолітних каркасів будівель та споруд зі з'єднанням арматури різьбовими муфтами. Результати проведених досліджень можуть використовуватися проєктувальниками для розробки проєктів улаштування підземних паркінгів та інших споруд в Україні. Запропоновані технологічні рішення дають можливість реалізувати такі проєктні рішення в складних гідрогеологічних умовах при ущільненій забудові та збереженні історичних об'єктів міста.

Ключові слова: підземний простір; паркінг; збірний каркас; різьбові муфти; технологія; гідрогеологічні умови; конструкції; підземні споруди

Вступ

Застосування збірних залізобетонних каркасів багатопверхових будівель є важливою складовою будівельної індустрії. Перенесення основних операцій з виготовлення будівельних конструкцій в заводські умови призводить до раціонального використання ресурсів та енергоносіїв, економії працевитрат, підвищення якості готових елементів. За умови ефективного використання транспортної інфраструктури та ритмічних поставок елементів високої заводської готовності на будівельний майданчик зведення основного каркасу зводиться до вико-

нання монтажних робіт при значному рівні механізації праці. Внаслідок значно скорочуються терміни виконання робіт та витрати коштів на утримання будівельного майданчику.

При зростаючому темпі урбанізації та розростання крупних міст розвинених країн світу спостерігається необхідність активного освоєння підземного простору (P'ichev, Nikiforova, & Gotman, 2017; Wang & Xu, 2012), в тому числі поблизу історичних забудованих центрів та в надскладних гідрогеологічних умовах (Подземная урбанизация – вектор движения в будущее; Реконструкция бесподвальных исторических зданий Санкт-Петербурга; Штомпель).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Активно розвиваються нові технології водовідведення та ізоляції об'єкта будівництва від впливу підземних вод (Юркевич, 2016), прискоренню темпів зведення огорожуючих та ізолюючих конструкцій будівлі (Trushko, Demenkov, & Tulin, 2018), а також інтенсифікації та раціоналізації найбільш витратних операцій на будівництві (Radkevych, & Netesa, 2017). Також ефективним напрямом є утилізація відходів гірничої промисловості при виготовленні продукції будівельного призначення, зокрема бетонів та будівельних сумішей, використання яких доцільне в умовах підземного будівництва (Shishkin, Netesa, & Scherba, 2017; Shishkin, Netesa N., & Netesa A., 2019).

В сучасному будівництві на території України зберігається перспектива використання збірних залізобетонних елементів при створенні підземних споруд (Тютюкін, 2016). В порівнянні з монолітними елементами застосування збірних призводить до зниження термінів виконання робіт, відповідно до значного скорочення обмежень інфраструктури навколо розташованих об'єктів. Особливо актуальною дана вимога стає при будівництві поблизу основних об'єктів транспортної інфраструктури, зокрема при будівництві перехоплюючих автостоянок. При цьому підземні споруди показали свою значну ефективність для споруд такого призначення.

Мета

В даних умовах необхідно реанімувати будівельну індустрію України з метою підвищити темпи освоєння підземного простору, покращення рівня життя, збільшення якості використання транспортної інфраструктури міст, зокрема історичних центрів в складних гідрогеологічних умовах (Беляєв, 2012) та ущільненої навколишньої забудови (Семко, Гасенко, Гарькава, & Данисько, 2018). Дану проблему можна вирішити шляхом визначення раціональних конструктивно-технологічних варіантів освоєння підземного простору, зокрема улаштування підземних паркінгів, у відношенні до способу з'єднання арматури збірних залізобетонних елементів.

Методика

Серед значної кількості різновидів збірних елементів заводського виготовлення найбільш

перспективними для підземних споруд є вертикальні несучі елементи. Серед них раціонально застосовувати збірні колони квадратного перетину розміром 300×300, 400×400 мм з кроками близько 6×6 м. Для багатопверхових підземних споруд, а також при створенні багатофункціональних комплексних будівель з кількома підземними поверхами однакового планування ефективним є використання технології збірно-монолітного залізобетону. При цьому застосовуються елементи колон на 2 або 3 поверхи, з проміжками бетонування в зоні перекриттів. Перекриття виконуються шляхом укладання на опалубку збірних пустотних плит, переважно неперервного формування, та улаштування монолітних ригелів між колонами (рис. 1).



Рис. 1. Збірно-монолітний каркас будівлі зі збірними плитами та монолітними ригелями

При цьому внаслідок заходу бетону ригелів у попередньо заармований та підготований простір пустот плит утворюється надійне з'єднання конструкцій перекриття. В результаті отримується поєднання швидкого зведення каркасу та свободи внутрішніх планувань, що особливо актуально для послідуєчого комплексного використання споруди з можливою зміною призначення під час довготривалої експлуатації підземного простору. Елементи просторової жорсткості, зокрема діафрагми, зручно поєднувати з огорожувальними конструкціями, вирішуючи також актуальну задачу будівництва в складних гідрогеологічних умовах, зокрема застосовуючи інноваційні технології улаштування «стіни в ґрунті».

Елементи заводського виготовлення мають високу якість, а в умовах сучасних виробничих

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ліній можуть виконуватись з підвищеною заводською готовністю. Проте найбільш трудомістким процесом під час монтажу є з'єднання елементів. Традиційна технологія передбачає установку колон у кондуктор, вивірювання елементів по рискам та ванношовне зварювання арматурних випусків з послідуною зачеканкою стиків цементно-піщаними розчином (рис. 2).



Рис. 2. Стикування колон за допомогою інвентарного кондуктора

Головний недолік даного способу полягає в значних витратах висококваліфікованої праці – близько 40...60 хвилин роботи зварювальника при з'єднанні 40 мм арматури. Крім того, істотними є неможливість використання високоміцної термічно зміцненої арматури, яка не підлягає зварюванню, а також трудомістка і малоефективна процедура контролю якості зварних стиків.

Результати

Вважається раціональним адаптування перспективного способу механічного з'єднання арматури різьбовими муфтами до використання зі збірними елементами. Фактично арматурний каркас за основними властивостями при монтажі є аналогом збірної колони, тому при визначенні ефективності способу монтажу ключові фактори є однаковими. При цьому просторова жорсткість збірного елемента буде значно більшою в порівнянні з жорсткістю арматурного каркасу, а центрування елемента буде відбуватись за рахунок специфічної форми контактних площадок (рис. 3).

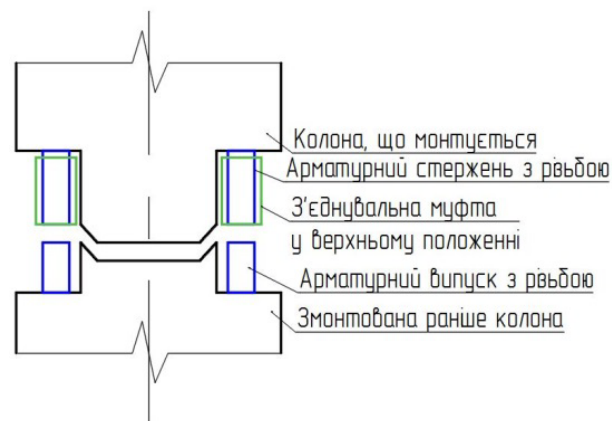


Рис. 3. Положення елементів колон під час монтажу при застосуванні методу різьбового з'єднання арматури

Наукова новизна

Встановлено, що одним з найбільш перспективних методів з'єднання арматури є механічне з'єднання різьбовими муфтами. Застосування його для з'єднання вертикальних несучих елементів збірних залізобетонних каркасів дозволяє скоротити термін монтажу елементів, зменшити кількість необхідного при виконанні робіт обладнання та значно прискорити процес улаштування несучих конструкцій. При об'єднанні з технологією виконання збірно-монолітного каркасу будівель можливе швидке та якісне зведення сучасних будівель ефективними індустріальними методами.

Практична значимість

Метод різьбового з'єднання арматури в порівнянні з ванношовним зварюванням значно підвищує швидкість монтажу елемента, і для 4 стержнів буде займати близько 2...3 хвилин. Під час скачування муфт з верхнього елемента (того, що монтується) на нижній водночас буде відбуватись центрування елементів, завдяки чому відсутня необхідність застосування кондуктора. Вивірка вертикального положення

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

може відбуватись шляхом утримання монтажної колони у вертикальному стані, фіксації зазорів між арматурними стержнями, що з'єднуються, та дотриманням їх під час скручування муфт. Остаточне положення елементів колон після монтажу зі з'єднанням арматури різьбовими муфтами показано на рис. 4.

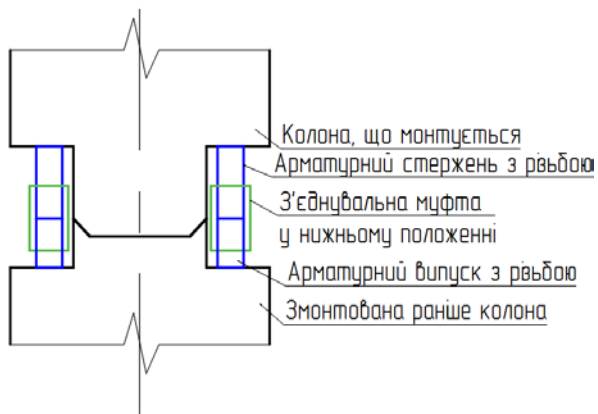


Рис. 4. Положення елементів колон після монтажу при застосуванні методу різьбового з'єднання арматури

Простір стику після завершення процедури контролю якості буде заповнений будівельним розчином або бетоном згідно проекту.

Висновки

Таким чином, запропонований автором метод механічного з'єднання арматури різьбовими муфтами має широкі перспективи до застосування при монтажі збірних та збірно-монолітних залізобетонних каркасів багатопверхових будівель. В умовах щільної міської забудови, необхідності швидкого та якісного зведення споруд та улаштування багатофункціональних комплексів зі значними об'ємами підземних приміщень актуальним є адаптація даного методу з метою реанімації будівельної індустрії у галузі заводського виготовлення елементів каркасів будівель та їх ефективного використання.

Метод різьбового з'єднання арматури в порівнянні з ванношовним зварюванням значно підвищує швидкість монтажу елемента, і для 4 стержнів буде займати близько 2...3 хвилин. Під час скачування муфт з верхнього елемента (того, що монтується) на нижній водночас буде відбуватись центрування елементів, завдяки чому відсутня необхідність застосування кон-

дуктора. Вивірка вертикального положення може відбуватись шляхом утримання монтажної колони у вертикальному стані, фіксації зазорів між арматурними стержнями, що з'єднуються, та дотриманням їх під час скручування муфт. Остаточне положення елементів колон після монтажу зі з'єднанням арматури різьбовими муфтами показано на рис. 4. Простір стику після завершення процедури контролю якості буде заповнений будівельним розчином або бетоном згідно проекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- P'ichev, V. A., Nikiforova, N. S. & Gotman, Yu. A. (2017). Structural safety security of objects with an underground part by transformation of soil properties: alabyano-baltic tunnel in Moscow. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54(2), 137-141.
- Radkevych, A. V., & Netesa, A. M. (2017). Determination and ranging of organizational and technological factors that define the rational decisions of re-bars connection. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 3 (69), 171-181.
- Shishkin, A., Netesa, N., & Scherba, V. (2017). Influence of the filler which contains the iron on the strength of concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/6 (89), 11-16.
- Shishkin, A., Netesa, N., & Netesa, A. (2019). Determining the rational compositions of low-strength concretes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/6 (97), 47-52.
- Trushko, O. V., Demenkov, P. A., & Tulin, P. K. (2018). Increasing the stability of extraction pits when building high-rise houses with multi-level underground car parking under conditions of highly deformed soils. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 9(13), 740-750.
- Wang, W. D., & Xu, Z. H. (2012). Design and construction of deep excavations in Shanghai. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 667-683.
- Беляев, В. Л. (2012). Освоение подземного пространства как способ охраны исторической среды г. Москвы. *Вестник МГСУ*, 8, 6-14.
- Семко, О. В., Гасенко, А. В., Гарькава, О. В., & Данисько, В. Ю. (2018). Вплив зведення інженерних споруд на розвиток пошкоджень несучих конструкцій будівель прилеглих територій. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 14, 49-56.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Подземная урбанизация – вектор движения в будущее [Электронный ресурс]

http://stopress.ru/archive/html/STO_0748

[noyabr_2016/podzemnaya_urbanizaciya_vektor_dvizheniya_v_budushee.html](http://stopress.ru/archive/html/STO_0748)

Реконструкция бесподвальных исторических зданий Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]

http://stopress.ru/archive/html/STO_0647sentyabr_2016/Rekonstrukciya_bespodvalnih_istoricheskikh_zdanii_Sankt-Peterburga_s_ustroistvom_podzemnogo_obema.html

Тютюкін, О. Л. (2016). Концепція руйнування підземних споруд на основі енергетико-фрактального

підходу. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 9, 61-67.

Штомпель, А. О. Подземное пространство современных городов: точка роста [Электронный ресурс] <https://www.sworld.com.ua/konfer27/49.pdf>

Юркевич, П. Б. (2016). Технологии устройства заглубленных подземных сооружений методом «сверху вниз». Новые технологии. Вебинар по теме «Устройство и проектирование фундаментов в сложных грунтовых условиях» 12.10.2016. [Электронный ресурс]

http://www.yurkevich.ru/pdf_publications/WEB-report.pdf

А. Н. НЕТЕСА^{1*}, А. В. РАДКЕВИЧ²

^{1*} Кафедра «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (063) 769 25 51, эл. почта andreynetes@meta.ua, ORCID 0000-0002-3364-3446

² Кафедра «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (098) 307 81 44, эл. почта anatolij.radkevich@gmail.com, ORCID 0000-0001-6325-8517

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ АРМАТУРЫ ДЛЯ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Целью приведенных в статье результатов исследований является определение рациональных конструктивно-технологических вариантов освоения подземного пространства, в частности о подземных паркингах, в отношении к способу соединения арматуры сборных железобетонных элементов. **Методика.** Изучен передовой опыт строительства аналогичных объектов на территории Украины. Рассмотрены варианты соединения арматуры ванношовной сваркой и резьбовыми муфтами. **Результаты.** Определены основные способы их реализации, установленные важнейшие параметры эффективности способов возведения вертикальных несущих элементов. Подтверждена важность реанимации строительной отрасли в области изготовления вертикальных несущих элементов сборных каркасов зданий и сооружений и их адаптация к соединению с помощью современных механических способов соединения арматуры. **Научная новизна.** Установлено, что одним из наиболее перспективных методов соединения арматуры есть механическое соединение резьбовыми муфтами. Применение его для соединения вертикальных несущих элементов сборных железобетонных каркасов позволяет сократить срок монтажа элементов, уменьшить количество необходимого при выполнении работ оборудования и значительно ускорить процесс сооружения несущих конструкций. При объединении с технологией выполнения сборно-монолитного каркаса зданий возможно быстрое и качественное возведение современных зданий эффективными индустриальными методами. **Практическая значимость.** Изучен опыт освоения подземного пространства в Украине и мире, определены проблемы строительства подземных сооружений в специфических сложных условиях гидрогеологии. Предложены эффективные технологические варианты сооружения вертикальных несущих элементов сборных и сборно-монолитных каркасов зданий и сооружений с соединением арматуры резьбовыми муфтами. Результаты проведенных исследований могут использоваться проектировщиками для разработки проектов сооружения подземных паркингов и других сооружений в Украине. Предложенные технологические решения дают возможность реализовать такие проектные решения в сложных условиях гидрогеологии при уплотняющей застройке и сохранении исторических объектов города.

Ключевые слова: подземное пространство; паркинг; сборный каркас; резьбовые муфты; технология; условия гидрогеологии; конструкции; подземные сооружения

^{1*}Department of Building production and geodesy, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian, Lazarian St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 769 25 51, e-mail andreynetesa@meta.ua, ORCID 0000-0002-3364-3446

²Department of Building production and geodesy, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian, Lazarian St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (098) 307 81 44, e-mail anatolij.radkevich@gmail.com, ORCID 0000-0001-6325-8517

PROSPECTS OF APPLICATION OF THE THREADED CONNECTION OF ARMATURE ARE FOR COLLAPSIBLE REINFORCE-CONCRETE FRAMEWORKS OF UNDERGROUND BUILDING

Purpose the results over of researches brought in the article is determination of rational structurally-technological variants of mastering of underground space, in particular arranging of the underground parking, in attitude toward the method of connection of armature of collapsible reinforce-concrete elements. **Methodology.** Front-rank experience of building of analogical objects is studied on territory of Ukraine. The variants of connection of armature are considered bath welding and threaded muffs. **Findings.** Certain basic methods are their realization set major parameters of efficiency of methods of erection of vertical bearing elements. It is confirmed importance of reanimation of building industry in making area of vertical bearing elements of collapsible frameworks of building and building and their adaptation to connection by means of modern mechanical methods of connection of armature. **Originality.** It is set that one of the most perspective methods of connection of armature there is mechanical connection by the threaded muffs. Application of him for connection of vertical bearing elements of collapsible reinforce-concrete frameworks the term of editing of elements allows to shorten, to decrease the amount of necessity at implementation of works of equipment and considerably to accelerate the process of arranging of load carrying structures. At an association with technology of implementation collapsible-monolithic to framework of building rapid and quality erection of modern building is possible by effective industrial methods. **Practical value.** Experience of mastering of underground space is studied in Ukraine and world, the problems of building of underground building are certain in the specific difficult terms of geohydrology. The effective technological variants of arranging of vertical bearing elements of the combined teams and collapsible-monolithic frameworks of building and building are offered with connection of armature by the threaded muffs. The results of the conducted researches can be drawn on by designers for development of projects of arranging of the underground parking and other building in Ukraine. The offered technological solutions give an opportunity to realize such project decisions in the difficult terms of geohydrology at making more compact building and maintenance of historical objects of city.

Keywords: underground space; parking; collapsible framework; threaded muffs; technology; terms of geohydrology; constructions; underground building

REFERENCES

- Il'ichev, V. A., Nikiforova, N. S. & Gotman, Yu. A. (2017). Structural safety security of objects with an underground part by transformation of soil properties: alabyano-baltic tunnel in Moscow. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54(2), 137-141. (in English)
- Radkevych, A. V., & Netesa, A. M. (2017). Determination and ranging of organizational and technological factors that define the rational decisions of re-bars connection. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 3 (69), 171-181. (in English)
- Shishkin, A., Netesa, N., & Scherba, V. (2017). Influence of the filler which contains the iron on the strength of concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/6 (89), 11-16. (in English)
- Shishkin, A., Netesa, N., & Netesa, A. (2019). Determining the rational compositions of low-strength concretes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/6 (97), 47-52. (in English)
- Trushko, O. V., Demenkov, P. A., & Tulin, P. K. (2018). Increasing the stability of extraction pits when building high-rise houses with multi-level underground car parking under conditions of highly deformed soils. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 9(13), 740-750. (in English)
- Wang, W. D., & Xu, Z. H. (2012). Design and construction of deep excavations in Shanghai. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 667-683. (in English)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Beljaev, V. L. (2012). Osvoenie podzemnogo prostranstva kak sposob ohrany istoricheskoy sredy g. Moskvy. *Vestnik MGSU*, 8, 6-14. (in Russian)

Semko, O. V., Hasenko, A. V., Harkava, O. V., & Danysko, V. Yu. (2018). Vplyv zvedennia inzhenernykh sporud na rozvytok poszkodzhen nesuchykh konstrukttsii budivel prylyhlykh terytorii. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 14, 49-56. (in Ukrainian)

Podzemnaja urbanizacija – vektor dvizhenija v budushhee [Elektronnyj resurs] http://stopress.ru/archive/html/STO_0748noyabr_2016/PODZEMNAYA_URBANIZACIYA__VEKTOR_DVIZHENIYA_V_BUDUSHEE.html (in Russian)

Rekonstrukcija bespodval'nyh istoricheskikh zdanij Sankt-Peterburga [Elektronnyj resurs] http://stopress.ru/archive/html/STO_0647sentyabr_2016/Rekonstrukcija_bespodvalnih_istoricheskikh_zdanij_Sankt-Peterburga_s_ustroistvom_podzemnogo_obema.html (in Russian)

Tiutkin, O. L. (2016). Kontseptsia ruinovannia pidzemnykh sporud na osnovi enerhetyko-fraktalnoho pidkhodu. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 9, 61-67. (in Ukrainian)

Shtompel', A. O. *Podzemnoe prostranstvo sovremennyh gorodov: tochka rosta* [Elektronnyj resurs] <https://www.sworld.com.ua/konfer27/49.pdf> (in Russian)

Jurkevich, P. B. (2016). Tehnologii ustrojstva zaglublennykh podzemnykh sooruzhenij metodom «sverhu vniz». Noveye tehnologii. Vebinar po teme «Ustrojstvo i proektirovanie fundamentov v slozhnyh grunto-vyh uslovijah» 12.10.2016. [Elektronnyj resurs] http://www.yurkevich.ru/pdf_publications/WEB-report.pdf (in Russian)

Надійшла до редколегії 29.04.2019

Прийнята до друку 05.05.2019

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191.82-028.33 (477.25)

В. Д. ПЕТРЕНКО^{1*}, В. И. ПЕТРЕНКО², Н. В. БЕЛОУС³, АХМАД АЛХДУР⁴

^{1*} Кафедра «Мости и тоннели», Днепровский 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

² Публичное акционерное общество «Киевметрострой», ул. Прорезная, 8, Киев, Украина, 01601, тел. +38 (044) 455 23 00, эл. почта petrenko@metrobud.kiev.ua

³ Публичное акционерное общество «Киевметрострой», ул. Прорезная, 8, Киев, Украина, 01601, тел. +38 (044) 455 23 00, эл. почта geodezmark@metrobud.kiev.ua

⁴ Университет Ель-Балка Аплайед, кафедра гражданского строительства, 19117, Ас-Сальт, Иордания, эл. почта a.m.alkhdour888@gmail.com, ORCID 0000-0002-4148-5994

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА КОЛЛЕКТОРНОГО ТОННЕЛЯ В Г. КИЕВЕ

Цель. В статье рассмотрены прогрессивные, научно обоснованные технологии, примененные при строительстве коллекторного тоннеля в г. Киеве. **Методика.** Для достижения поставленной цели авторами были рассмотрены и проанализированы опыт и результаты строительства коллекторного коммунального тоннеля длиной около 10 км в сложных инженерно-геологических условиях в слабых и обводненных породах. **Результаты.** Анализ условий строительства показал, что правобережье г. Киева имеет характерный рельеф местности, чем обусловлена глубина заложения тоннеля от 3...4 м до 96...98 м. Был разработан профиль тоннеля с самотечным режимом. Внутренний диаметр обделки коммунального тоннеля назначен, исходя из расчетной площади поперечного сечения пропускаемого по коллектору потока. При строительстве коллекторного тоннеля применена обделка из обжатых в породу железобетонных элементов, которая позволяет замыкающим блокам, заводимым с торца собираемого кольца, с помощью щитовых гидроцилиндров разжать кольцо до проектного диаметра. Подземные работы на всем протяжении тоннеля велись с применением ряда высокоэффективных технологий, включая проходку выработок щитовыми механизированными комплексами, с использованием замораживания грунтов, а также использования опускных колодцев в тиксотропной рубашке. Проектом строительства коллекторного тоннеля были предусмотрены мероприятия по охране окружающей среды. **Научная новизна.** Разработаны основы технологий, реализованные при проектировании и строительстве коллекторного коммунального тоннеля и заключающиеся в оптимальном применении с учетом сложных инженерно-геологических условий. **Практическая значимость.** Строительные конструкции тоннелей главного городского коллектора были запроектированы и построены в соответствии с требованиями нормативных документов, что дало возможность обеспечить мегаполис важнейшим коммунальным объектом для дублирования стратегической системы экологической безопасности.

Ключевые слова: коллекторный тоннель; инженерно-геологические условия; тип крепи; щитовая проходка; замораживание; опускной колодец

Введение

В столице Украины завершено строительство главного городского самотечного резервного коллектора. Как известно, сданный в эксплуатацию в 1970 году главный коллектор длиной 9,77 км и диаметром 2,9 м по результатам обследования в 1999 году был признан аварийным, а в 2005 году был внесен в Государственный реестр потенциально опасных объектов государственного значения, как, например, и коллекторный тоннель г. Харькова (Garmash, Bondarenko, Zubko, & Goncharenko, 2016).

В результате проведенных в 2007, 2010 и 2014 годах обследований этого коллектора было установлено, что в некоторых местах глубина газовой коррозии (а это становится причиной аварийных ситуаций, как подчеркивают Zhang, De Schryver, & De Gusseme, 2008) его металлических конструкций достигала 15 см.

На арматуре стен и перекрытий, а также в общем на всех забетонированных металлических конструкциях коррозия с каждым годом проявлялась все глубже. В этой связи дальнейшая эксплуатация объекта могла стать причи-

ной масштабной экологической катастрофы (Anbari, Massoud, & Abbas, 2017).

По указанным причинам было принято решение по строительству дублирующего коллектора длиной 9,9 км для обеспечения надежного водоотведения коммунальных стоков в правобережной части Киева. Заказчиком на проведение работ был «Киевводоканал», а генеральным подрядчиком «Киевметрострой».

Правобережье г. Киева имеет характерный рельеф местности, чем обусловлена глубина заложения коллектора от 3...4 м до 96...98 м. Соответственно из-за таких перепадов высот коллектор должен работать самотеком.

Особенностью тоннелей такого типа являются малые диаметры, затрудняющие механизацию проходческих работ, а также сложные инженерно-геологические условия сооружения (ДСТУ-Н Б В.2.5-68:2012, 2013; ДСТУ-Н Б В.2.5-70:2013, 2014).

Цель

На основе опыта конструирования и строительства протяженного коммунального тоннеля в г. Киеве выполнено научно-техническое обоснование сооружения объектов экологического значения в сложных инженерно-геологических, рельефных и урбанистических условиях мегаполисов.

Методика

Подземные работы на протяжении почти всех 10 км трассы тоннеля велись в чрезвычайно сложных инженерно- и гидрогеологических условиях в несколько этапов с применением практически всех новых технологий: проходка выработок щитовыми механизированными комплексами (Петренко В. И., Петренко В. Д., & Тютюкин, 2005; Петренко В. Д., Тютюкин, & Петренко В. И., 2012; Петренко, Тютюкин, & Кулаженко, 2016), замораживание грунтов, опускные колодцы в тиксотропной рубашке (Гарбер, 1996).

Как известно, наибольшее распространение при строительстве коллекторных тоннелей получили обделки из обжатых в породе железобетонных элементов (ДБН В.2.3-7-2010, 2011), которые позволяют замыкающим блокам, заводимым с торца собираемого кольца, с помощью щитовых гидроцилиндров разжать кольцо до

фактически разработанного контура грунта (рис. 1).

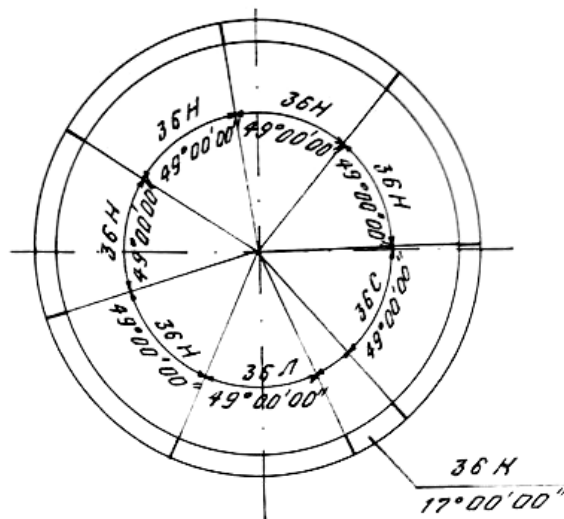


Рис. 1. Обделка из обжатых в породе железобетонных элементов до фактически разработанного контура грунта

Первичная обделка магистральных тоннелей выполнялась из сборных железобетонных колец из блоков с внешним диаметром 3,6 м, а вторичная – колец с внешним диаметром 3,06 м и внутренним 2,76 м. Технология сооружения вторичной тоннельной обделки (Sammal, Afanasyova, & Levishcheva, 2016) предусматривала также защиту бетона колец от газовой коррозии и гидроизоляцию полиэтиленом. При этом были приняты высокие требования к защитным гидроизоляционным материалам, которые должны обеспечивать надежность сооружения на долгие годы (ДСТУ-Н Б В.2.5-68:2012, 2013; ДСТУ-Н Б В.2.5-70:2013, 2014).

Внутренний диаметр обделки коммунального тоннеля следует назначать, исходя из расчетной площади поперечного сечения пропускаемого по коллектору потока. Однако величина расхода этого потока за счет принимаемых по трассе тоннеля стоков увеличивается, в связи с чем возникает необходимость в увеличении диаметра обделки. Однако такой вариант параметров крепления тоннеля является нерациональным, поскольку многократное (с целью максимального приближения внутреннего сечения коллектора к пропускаемому расходу стоков) изменение диаметра тоннеля техноло-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

гически и экономически нецелесообразно. Это обусловлено тем, что в таком варианте исключается возможность унификации элементов конструкции обделок, щитов и другого проходческого оборудования.

В связи с вышеизложенным, в проекте были приняты неизменные внутренние диаметры обделки и выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния обделки с учетом изменяющейся глубины заложения тоннеля, горного давления и дебита и соответственно сечения протекающего по тоннелю гидравлического двухфазного потока.

Результаты

Проходка коллекторного тоннеля выполнялась в сложных инженерно- и гидрогеологических условиях на основе изысканий, проведенных ранее в соответствии с «Рекомендациями по инженерно-геологическим изысканиям для подземного промышленного и гражданского строительства» и с учетом других нормативных документов.

Описание по объекту климата, геоморфологии, рельефа, гидрологии, геологического строения, гидрогеологических условий и физико-механических характеристик дано в «Отчете об инженерно-геологических изысканиях по трассе 2-й нитки Главного городского канализационного коллектора в г. Киеве».

Сечение коллектора от ПК0 до ПК0+90 вписывается в толщу спондиловой глины, сильно нарушенной размывными процессами, водоносной по микротрещинам. В сводовой части тоннеля на участке примыкания к колодцу № 1 залегают аллювиальные отложения р. Лыбидь (пески мелкозернистые, водонасыщенные). Уровень грунтовых вод выше лотковой части тоннеля на данном участке изменяется от 6,0 до 1,5 м.

От ПК0+90 до ПК1+75 сечение тоннеля вписывается в глины спондиловые, мелкотрещиноватые, водопроницаемые по трещинам, опесчаненные глины и пески мергелистые, глинистые, маловлажные. Уровень грунтовых вод выше лотковой части тоннеля составляет до 13,0 м.

В пределах ПК1+75...ПК4+50 тоннель пересекает глины спондиловые, сильно трещиноватые, нарушенные размывными процессами, во-

доносные по трещинам, в лотковой части сечения тоннеля залегают пески мергелистые, глинистые, маловлажные. Уровень грунтовых вод выше лотковой части составляет 12,0 м.

От ПК4+50 до ПК6+20 в верхней части тоннеля залегают глины спондиловые с уже указанными характеристиками, в лотковой – пески глинистые, маловлажные. Уровень грунтовых вод – 12,0...20,0 м выше лотковой части тоннеля.

В связи с малой защитной толщей спондиловой глины над шельгой свода отдельных участков тоннеля, а местами в связи с ее полным отсутствием, при проходке были возможны вывалы пород и водопроявления в виде течей различной интенсивности. Для безопасного ведения работ на участке от ПК0 до ПК6+20 было рекомендовано применение специального способа строительства тоннелей – искусственное замораживание грунтов.

От ПК6+20 до ПК75+90 сечение тоннеля полностью пересекало глину спондиловую, местами трещиноватую, с тонкими песчаными прослойками, полутвердой и тугопластичной консистенции, водопроницаемой по трещинам и песчаным прослойкам. Защитная толща глины в пределах этого участка была достаточной для сооружения тоннеля без применения специальных способов работ.

В пределах ПК75+90...ПК76+70 сечение тоннеля вписывается в толщу глины сильно трещиноватой, нарушенной размывными процессами, водоносной по трещинам. Уровень грунтовых вод на 17 м выше лотковой части сооружений. В связи с малой защитной толщей глины над шельгой свода сооружения и ее нарушенностью при проходке было рекомендовано применение специального способа работ – предварительного замораживания грунтов в кровле коллекторного тоннеля с помощью опережающих зонтичных скважин.

От ПК76+70 до ПК95+55 тоннель пересекает глину спондиловую, местами трещиноватую, с тонкими песчаными прослойками, водопроницаемую по трещинам и песчаным прослойкам тугопластичной и полутвердой консистенции. Величина защитной толщины глины над шельгой свода тоннеля была достаточной для проходки на этом участке без применения специальных способов работ.

На участке ПК95+55 и до примыкания к колодцу № 12 (ПК97+32) сооружение коллектора происходило в зоне эрозионного размыва толщи спондиловых глин, осложненных оползневыми процессами. Тоннель от ПК95+55 до ПК95+90 проходил в спондиловой глине трещиноватой, нарушенной, водоносной по трещинам. Уровень грунтовых вод был выше лотковой части проходимого тоннеля на 7,0...12,0 м.

Далее и до примыкания к колодцу № 12 тоннель проходил в делювиально-оползневых грунтах – супесях пластичных и текучих, а также в песках водонасыщенных, реже в суглинках мягкопластичных. Уровень грунтовых вод в пределах ПК95+90...ПК96+55 находился на 7,0 м выше лотковой части и до нижней отметки лотка сооружения.

Начиная от ПК96+45 и до ПК97+32 залегают маловодообильные и невыдержанные по уровню грунтовые воды типа «верховодка». Для безопасного ведения проходческих работ на участке ПК95+55...ПК97+32 было принято решение о применении специального способа работ – предварительного замораживания грунтов в кровле коллекторного тоннеля с помощью опережающих зонтичных скважин (рис. 2).

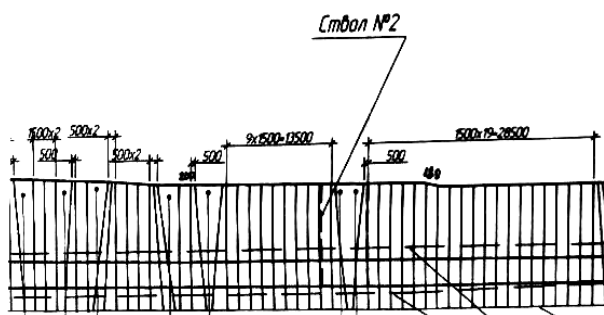


Рис. 2. Схема опережающих зонтичных и вертикальных скважин в районе ствола №2

При сооружении руддворов в связи с малой защитной толщиной глины над шельгой свода сооружений, а местами ее отсутствием, были также применены специальные способы работ (Петренко В. Д., Петренко В. И., & Савинков, 2011; Петренко В. И., & Петренко В. Д., 2014).

Шахтные стволы (колодцы) по трассе спроектированного коллектора пересекают толщу четвертичных отложений бурых и пестрых глин неогена, харьковского и киевского ярусов палеогена, четвертичный и полтавско-харьковский водоносные горизонты. Поэтому

при сооружении шахтных стволов были применены специальные способы – искусственное замораживание грунтов и проходка стволов в тиксотропной рубашке. В местах заложения стволов были также учтены участки эрозионного размыва толщи спондиловой глины.

Обделка шахтных стволов была представлена двумя типами: чугунная тубинговая обделка с наружным и внутренним диаметрами, равными 7,5/7,0 м и 7,8/8,5 м. Донная часть стволов была запроектирована и выполнена из монолитного железобетона, а сопряжения коллектора со стволами – монолитными бетонными с распорными монолитными железобетонными рамами.

Сооружение тоннелей коллектора производилось механизированными щитами с применением на отдельных участках метода искусственного замораживания грунтов. Типы обделок были выбраны с учетом гидрогеологических условий и способов производства работ. При этом руддворы, монтажно- и демонтажно-щитовые камеры были запроектированы и выполнены из чугунной тубинговой обделки с наружным/внутренним диаметрами 5,49/5,1 м.

Обделка коллекторного тоннеля была представлена тремя типами:

а) сборная железобетонная обделка (бетон В25, арматура класса АIII), обжатая в породе, с наружным и внутренним диаметрами 3,636/3,316 м, применяемая на участках щитовой проходки без реализации специальных способов работ;

б) сборная железобетонная обделка (бетон В25, арматура класса АIII), обжатая в породе, с наружным и внутренним диаметрами 3,636/3,316 м из армометаллоблоков с металлическим экраном толщиной 8 мм, предусмотренная в проекте в местах пересечения коллектора с линиями метрополитена;

в) чугунная тубинговая обделка с наружным и внутренним диаметрами 3,77/3,38 м, запроектированная для участков коллектора, сооружаемых в искусственно замороженных грунтах, а также на участке от ПК6+52 до ПК7+88, на котором сооружение коллектора производилось с помощью укладчика тоннельной обделки.

Гидроизоляция стволов и тоннелей коллектора, выполняемая с целью защиты основной обделки от грунтовых вод, обеспечивалась пу-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

тем реализации следующих мероприятий. Прежде всего, осуществлялось первичное и контрольное нагнетание за обделку цементно-песчаного и цементного растворов. Кроме того, выполнялась чеканка швов чугунных обделок стволов и коллектора на участках, сооружаемых в искусственно замороженных грунтах, с заполнением оставшейся части чеканочной канавки БУСом. Чеканку сборной железобетонной обделки выполняли составом ВРЦ.

При строительстве выработок на первом этапе были сооружены ствол № 1 и камера К-1, от которой проходились каналы Кл-1...Кл-4 и камеры К1/2 и К1/3. Далее был пройден ствол шахты № 2 и коллекторный тоннель до ствола шахты № 6 длиной 4,2 км. На этом участке применялась щитовая проходка с монтажом первичной и вторичной обделок и сооружение комплекса переключений на стволе № 6. Затем были построены промежуточные камеры № 2 и № 4 и завершен комплекс переключений из камеры № 1.

От ствола № 6 до ствола № 9 был пройден тоннель общей длиной 3,6 км, два ствола № 9/1 и № 9/2 с аналогичными параметрами и выпол-

нен комплекс переключений коллекторов в камеру № 9. На этом участке была смонтирована вторичная обделка в виде железобетонной трубы с бетонным заполнением.

Проходка тоннеля от ствола № 9 до ствола № 12 осуществлялась щитовым способом с сооружением после проходки внутренней обделки на всю длину участка тоннеля. При этом было выполнено замораживание грунтов в узле переключения коллекторов в камеру № 9 и пройдены стволы № 10/1...10/5 и 12/1...12/2. Кроме того, были сооружены камеры коллектора К-10/1...К-10/5, К-12/1, К-12/2 с антикоррозионной защитой.

Замораживание грунтов выполнялось при проходке тоннеля на участке от ПК95+35 до ПК 97+35,3, а также при сооружении стволов, рудворов, монтажно- и демонтно-щитовых камер. Бурение скважин под замораживающие колонки предусматривалось станком УРБ-ЗАМ. Для поддержания отрицательной температуры приняты передвижные холодильные станции ПХС-100 производительностью 545000-135000 кДж/час при температуре рассола -20 °С (рис. 3).

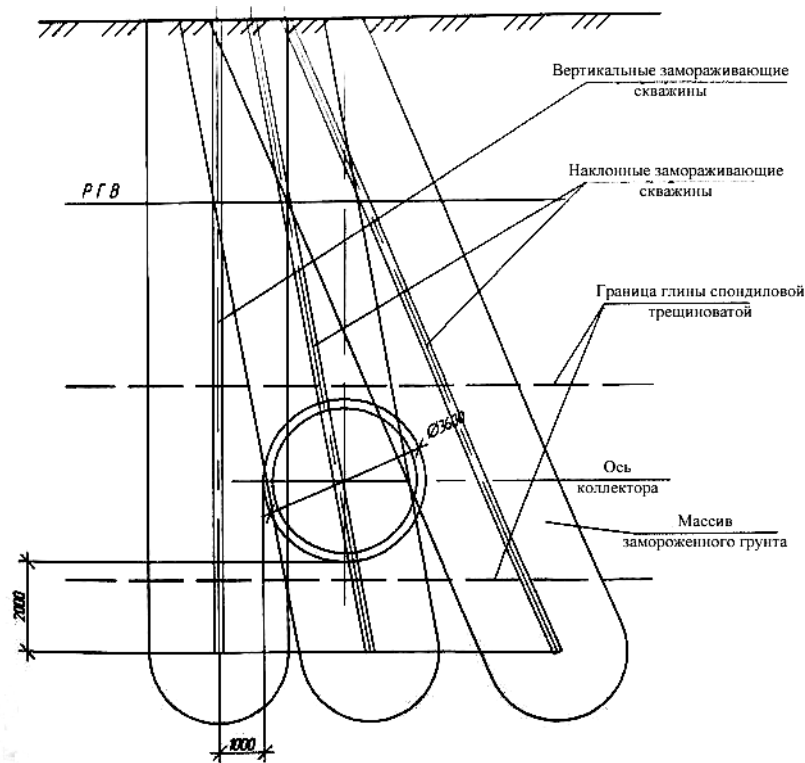


Рис. 3. Схема работ специального способа замораживания грунтов над коллекторным тоннелем

Проектом було передусмотрено сооружение коллектора от ПК75+85 до ПК76+75 с применением цементации грунтов с поверхности через скважины, пробуренные станком УБМ-04 «Бауэр», с подачей раствора через буровой инструмент установкой «Турбо».

При проходке стволов оборудовался бадье-вой подъем, который затем переоборудовался под горный комплекс с клетьевым подъемом. Горизонтальный транспорт при проходке состоял из контактных электровозов с колесей 600 мм и вагонеток емкостью 0,75 м³. Для перевозки железобетонных блоков применялись блок-ковозки, доставка сухой смеси для первичного нагнетания осуществлялась в специальных контейнерах.

Для проветривания забоев во время проходческих работ была применена нагнетательная схема вентиляции с вентиляторами местного проветривания типа ВМ-6 производительностью 360 м³/мин. Данные вентиляторы располагались не ближе 10 м от устья ствола. По мере подвигания забоя через каждые 400 м в трубопровод монтировались побудительные вентиляторы типа ВМ-6. При расстоянии между стволами более 1 км сооружались вентиляционные скважины, через которые в забой подавался свежий воздух.

Главный водоотлив осуществлялся насосами ЦНС 180-128 путем выдачи воды из зумпфа на поверхность, забойный водоотлив выполнялся насосами ГНОМ 25-20.

Проектом строительства коллекторного тоннеля были предусмотрены мероприятия по охране окружающей среды в соответствии с требованиями существующих нормативных документов. При этом строительные площадки были размещены с учетом минимального сноса зеленых насаждений, а сточные воды, собираемые на площадках, отводились в городскую канализационную сеть и транспортировались на очистные сооружения. Сброс шахтных вод в ливневую канализацию производился после их отстоя и осветления.

Научная новизна и практическая ценность

В соответствии с существующими новыми технологиями, эффективность которых подтверждается практикой, строительство коллектора осуществлялось с разбивкой трассы на несколько участков различной длины в зависимости от ее конфигурации и рельефа поверхности.

При этом участки тоннелей располагались под уклоном 0,0005 с возведением в местах сопряжения камер-колодцев для накопления стоков и их дальнейшего транспортирования само-теком.

Научную новизну работы составляет то, что примененные технологии сооружения коллекторного тоннеля, состоящего из вертикальных, наклонных и горизонтальных выработок учитывают инженерно-геологические условия, а именно пересечение толщи глин спондилевых и делювиальных отложений. Комбинационный расчет на горное давление и напор гидравлического двухфазного потока позволил обосновать размеры обделок коллекторного тоннеля с применением трех типов.

Практическая значимость состоит в том, что строительные конструкции тоннелей главного городского коллектора были запроектированы и построены в соответствии с требованиями нормативных документов, что дало возможность обеспечить мегаполис важнейшим коммунальным объектом для дублирования стратегической системы экологической безопасности.

Выводы

Как показал опыт разработки и применения прогрессивных технологий строительства коллекторного тоннеля в г. Киеве, решение такой сложной научно-технической проблемы было сопряжено с рядом трудностей. Это было обусловлено, прежде всего, сложностью инженерно-геологических условий за счет неравномерного рельефа с различным превышением грунтовых наслоений над проходимым тоннелем, скоплением большого количества грунтовых вод и инженерных коммуникаций в верхних пластах. Причем, практически во всех случаях строительства таких инженерных сооружений в крупных городах указанные сложности всегда присутствуют.

Это и предопределило высокий уровень проектной разработки строительства новой линии коммунального коллекторного тоннеля в г. Киеве. Были применены эффективные способы, включающие проходку тоннелей с применением проходческих механизированных щитовых комплексов, способа искусственного замораживания грунтов с применением рассольного варианта, а также использования опускных колодцев в тиксотропной рубашке. Указанные технологии и способы имели высокий уровень

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

технологичности и технико-экономической эффективности.

Таким образом, их промышленная реализация была осуществлена на основе огромного опыта инженеров-проектировщиков и производственников, накопленного за последние десятилетия при строительстве тоннелей метрополитена в г. Киеве, Днестровской гидроаккумулирующей гидроэлектростанции и горных тоннелей в условиях Ингулецкого горно-обогатительного комбината.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Anbari, M., Massoud, T., & Abbas R. (2017). Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection networks. *Journal of environmental management*, 190, 91-101.
- Garmash, A., Bondarenko, D., Zubko, G., & Goncharenko, D. (2016). On renovation of the destroyed tunnel sewer collector in Kharkiv. *World Journal of Engineering*, 13(1), 72-76.
- Sammal, A. S., Afanasova, O. V., & Levishcheva, O. M. (2016) Geomechanical estimation of the effectiveness of sewer tunnel repair by the "pipe in pipe" technology. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 71-77.
- Zhang L., De Schryver P., & De Gusseme B. (2008) Chemical and biological technologies for hydrogen sulphide emission control in sewer systems: A review. *Water Research*, 42, 1-12.
- Гарбер, В. А. (1996). Научные основы проектирования тоннельных конструкций с учетом технологии их сооружения (Т. 1). Москва: АО ЦНИИС.
- ДБН В.2.3-7-2010 (2011). *Споруди транспорту. Метрополітени*. Київ: Мінрегіонбуд України.
- ДСТУ-Н Б В.2.5-68:2012 (2013). *Настанова з будівництва, монтажу та контролю якості трубопроводів зовнішніх мереж водопостачання та каналізації*. Київ: Мінрегіонбуд України.
- ДСТУ-Н Б В.2.5-70:2013 (2014). *Колекторні тунелі, що споруджуються способом щитової проходки. Настанова з будівництва та приймання робіт (СН 322-74, MOD)*. Київ: Мінрегіонбуд України.
- Петренко, В. Д., Петренко, В. И., & Савинков, Г. К. (2011). Надежность способов закрепления грунтов при эксплуатации перегонных тоннелей Киевского метрополитена. *Вісник ДНУЗТу імені академіка В. Лазаряна*, 35, 135-139.
- Петренко, В. Д., Тютькин, А. Л., & Петренко, В. И. (2012). Обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепи. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 1, 75-81.
- Петренко, В. Д., Тютькин, А. Л., & Кулаженко, О. М. (2016). Експериментальні дослідження теорій гірського та гідростатичного тиску на щит при проходці в слабких водонасичених грунтах. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 9, 32-41.
- Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тютькин, А. Л. (2005). *Современные технологии строительства метрополитенов в Украине*. Дніпропетровськ: Наука і освіта.
- Петренко, В. И., & Петренко В. Д. (2014). Обоснование параметров химического закрепления грунтов при строительстве Киевского метрополитена. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 4, 60-66.

В. Д. ПЕТРЕНКО^{1*}, В. І. ПЕТРЕНКО², М. В. БІЛОУС³, АХМАД АЛХДУР⁴

^{1*} Кафедра «Мости і тунелі», Дніпровський 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

² Публічне акціонерне товариство «Київметробуд», вул. Прорізна, 8, Київ, Україна, 01601, тел. +38 (044) 455 23 00, ел. пошта petrenko@metrobud.kiev.ua

³ Публічне акціонерне товариство «Київметробуд», вул. Прорізна, 8, Київ, Україна, 01601, тел. +38 (044) 455 23 00, ел. пошта geodezmark@metrobud.kiev.ua

⁴ Університет Ель-Балка Аплайд, кафедра цивільного будівництва, 19117, Ас-Сальт, Йорданія, ел. пошта a.m.alkhdour888@gmail.com, ORCID 0000-0002-4148-5994

ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ БУДІВНИЦТВА КОЛЕКТОРНОГО ТУНЕЛЮ В М. КИЄВІ

Мета. У статті розглянуті прогресивні, науково обґрунтовані технології, що застосовані при будівництві колекторного тунелю в м. Києві. **Методика.** Для досягнення поставленої мети авторами були розглянуті і проаналізовані досвід і результати будівництва колекторного комунального тунелю довжиною близько

10 км в складних інженерно-геологічних умовах в слабких і обводнених породах. **Результати.** Аналіз умов будівництва показав, що правобережжя м. Києва має характерний рельєф місцевості, чим обумовлена глибина закладення тунелю від 3...4 м до 96...98 м. Був розроблений профіль тунелю з самопливним режимом. Внутрішній діаметр оправи комунального тунелю призначено виходячи з розрахункової площі поперечного перерізу потоку, що пропускається по колектору. При будівництві колекторного тунелю застосована оправа із обтиснутих в породу залізобетонних елементів, яка дозволяє замикаючим блокам, що заводяться з торця кільця, що збирається, за допомогою щитових гідроциліндрів розтиснути кільце до проектного діаметру. Підземні роботи на всій довжині тунелю велися із застосуванням ряду високоефективних технологій, включаючи проходку виробок щитовими механізованими комплексами, з використанням заморожування ґрунтів, а також використання опускних колодязів в тиксотропній сорочці. Проектом будівництва колекторного тунелю були передбачені заходи з охорони навколишнього середовища. **Наукова новизна.** Розроблено основи технологій, що реалізовані при проектуванні і будівництві колекторного комунального тунелю і полягають в оптимальному застосуванні з урахуванням складних інженерно-геологічних умов. **Практична значимість.** Будівельні конструкції тунелів головного міського колектора були запроєктовані і побудовані відповідно до вимог нормативних документів, що надало можливості забезпечити мегаполіс найважливішим комунальним об'єктом для дублювання стратегічної системи екологічної безпеки.

Ключові слова: колекторний тунель; інженерно-геологічні умови; тип кріплення; щитова проходка; заморожування; опускний колодязь

V. D. PETRENKO^{1*}, V. I. PETRENKO², M. V. BILOUS³, AHMAD ALKHDOUR⁴

^{1*} Department «Bridges and tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

² Public Joint Stock Company "Kyivmetrostroy", 8 Proreznna Str., Kyiv, Ukraine, 01601, tel. +38 (044) 455 23 00, e-mail petrenko@metrobud.kiev.ua

³ Public Joint Stock Company "Kyivmetrostroy", 8 Proreznna Str., Kyiv, Ukraine, 01601, tel. +38 (044) 455 23 00, e-mail geodezmark@metrobud.kiev.ua

⁴ Al-Balqa` Applied University, Department of civil engineering, 19117, Al-Salt, Jordan, e-mail a.m.alkhdour888@gmail.com, ORCID 0000-0002-4148-5994

PROGRESSIVE CONSTRUCTION TECHNOLOGIES OF COLLECTOR TUNNEL IN KYIV

Purpose. In the article has been considered progressive and scientifically based technologies which was applied under construction of the collector tunnel in Kyiv. **Methodology.** To achieve this goal, the authors reviewed and analyzed the experience and results of the construction of a collector communal tunnel with a length of about 10 km in difficult geotechnical conditions in weak and watered contented soils. **Findings.** An analysis of the construction conditions showed that the right bank of the city of Kyiv has a characteristic terrain, which determines the depth of the tunnel from 3...4 m to 96...98 m. A profile of the tunnel with gravity mode was developed. The inner diameter of the lining of the communal tunnel was assigned on the basis of the calculation cross-sectional area of the flow through the collector. Under construction of the collector tunnel, a lining from the reinforced concrete elements was used, which allows the closing blocks, which are driven from the end of the assembled ring by means of shield hydraulic cylinders to unclasp to the design diameter. Underground work of the all length of tunnel was carried out using a number of highly efficient technologies, including driving the workings with shield mechanized complexes, using soil freezing and the use of sink wells in a thixotropic jacket. The construction project of the collector tunnel provided for environmental protection measures. **Originality.** The basics of technology have been developed and implemented in the design and under construction of a collector communal tunnel, which consist of optimal application, taking into account difficult engineering and geological conditions. **Practical value.** The building structures of the tunnels of the city collector were designed and built in accordance with the requirements of specification documents, which made it possible to provide the metropolis with the most important communal unit for duplicating the environmental safety strategic system.

Keywords: collector tunnel; geotechnical conditions; lining type; shield driving; freezing; sink a well

REFERENCES

- Anbari, M., Massoud, T., & Abbas R. (2017). Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection networks. *Journal of environmental management*, 190, 91-101. (in English)
- Garmash, A., Bondarenko, D., Zubko, G., & Goncharenko, D. (2016). On renovation of the destroyed tunnel sewer collector in Kharkiv. *World Journal of Engineering*, 13(1), 72-76. (in English)
- Sammal, A. S., Afanasova, O. V., & Levishcheva, O. M. (2016) Geomechanical estimation of the effectiveness of sewer tunnel repair by the "pipe in pipe" technology. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 71-77. (in English)
- Zhang L., De Schryver P., & De Gussem B. (2008) Chemical and biological technologies for hydrogen sulphide emission control in sewer systems: A review. *Water Research*, 42, 1-12. (in English)
- Garber, V. A. (1996). Nauchnye osnovy proektirovaniya tunnel'nyh konstrukcij s uchetom tehnologii ih sooruzhenija, 1. Moskva: AO CNIIS. (in Russian)
- DBN V.2.3-7-2010 (2011). *Sporudy transportu. Metropoliteny*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU-N B V.2.5-68:2012 (2013). *Nastanova z budivnytstva, montazhu ta kontroliu yakosti truboprovodiv zovnishnikh mrezh vodopostachannia ta kanalizatsii*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU-N B V.2.5-70:2013 (2014). *Kolekturni tuneli, shcho sporudzhuutsia sposobom shchytovoi prokhodky. Nastanova z budivnytstva ta prymannia robit (CH 322-74, MOD)*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Petrenko, V. I., & Savinkov, G. K. (2011). Nadezhnost' sposobov zakreplenija gruntov pri jekspluatacii peregonnyh tonnel' Kievskogo metropolitena. *Visnyk DNUZTu imeni akademika V. Lazariana*, 35, 135-139. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Tjut'kin, A. L., & Petrenko, V. I. (2012). Obzor analiticheskikh i jeksperimental'nyh metodov issledovaniya vzaimodejstvija massiva i krep'i. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 1, 75-81. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, A. L., & Kulazhenko, O. M. (2016). Eksperymentalni doslidzhennia teorii hirsokoho ta hidrostatchnoho tysku na shchyt pry prokhodtsi v slabkykh vodonasychenykh gruntakh. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 9, 32-41. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. I., Petrenko, V. D., & Tjut'kin, A. L. (2005). *Sovremennye tehnologii stroitel'stva metropolitenov v Ukraine*. Dnipropetrovsk: Nauka i osvita. (in Russian)
- Petrenko, V. I., & Petrenko V. D. (2014). Obosnovanie parametrov himicheskogo zakreplenija gruntov pri stroitel'stve Kievskogo metropolitena. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 4, 60-66. (in Russian)

Надійшла до редколегії 06.05.2019.

Прийнята до друку 20.05.2019.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21-047.84:528

О. М. ПШІНЬКО¹, А. В. КРАСНЮК², О. В. ГРОМОВА³,
А. С. ЩЕРБАК^{4*}, Т. В. СТАРОСОЛЬСЬКА⁵

¹ Кафедра «Управління проектами, будівлі та будівельні матеріали», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 46, ел. пошта phinko@mail.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1598-2970

² Кафедра «Графіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 59, ел. пошта krasnyuk@mail.diit.edu.ua ORCID 0000-0002-1400-9992

³ Кафедра «Управління проектами, будівлі та будівельні матеріали», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 46, ел. пошта elenagromova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5149-4165

^{4*} Кафедра «Графіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. 38 (067) 586 45 74, ел. пошта pro-f@ukr.net, ORCID 0000-0003-1340-0284

⁵ Кафедра «Графіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 791 35 94, ел. пошта simatn777@gmail.com, ORCID 0000-0002-3851-9612

ПИТАННЯ ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИШУКУВАНЬ ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ ТА БУДІВНИЦТВА МОСТІВ

Мета. Мета роботи – постановка та вирішення проблеми землеустрою і нормування точності інженерно-геодезичних робіт на етапах проектування та будівництва мостів. За методом проєкцій з числовими позначками визначити основні роботи при проектуванні земляного полотна та побудови профілю топографічної поверхні. **Методика.** За методом проєкцій з числовими відмітками розглядаються основні питання при проектуванні земляного полотна, якщо ухил земляного полотна заданий графічно, а також проведено аналіз двох способів побудови профілю топографічної поверхні. **Результати.** В процесі проектування при будівництві мостів вирішується питання розташування споруди мосту на конкретній місцевості, для чого необхідна інформація про її рельєф. Незаконірна форма поверхні землі не дає можливості її зображення в звичайних ортогональних проєкціях на взаємно перпендикулярних площинах, а також в аксонометрії та в перспективі. Основним зображенням є горизонтальна проєкція, на якій показують окремі точки, розташовані на певній висоті, та лінії, що з'єднують точки з однаковою висотою. **Наукова новизна.** Встановлені основні переваги методу проєкцій з числовими відмітками, а саме простота в побудові зображення об'єкта, що обумовлено застосуванням ортогонального проектування об'єкта тільки на одну площину проєкцій, також доведена зручність у визначенні висотних розмірів об'єкта, поданих у вигляді числових відміток його характерних точок. **Практична значимість.** При проведенні землеустрою та геодезичних вишукувань за допомогою методу проєкцій з числовими відмітками зображають рельєф місцевості, що дозволяє виконувати інженерно-геодезичну розвідку і розбивку споруд. Цей метод використовують також для зображення і проектування на земній поверхні різних транспортних споруд (мости, тунелі, дорожні естакади), а також меліоративних та гідротехнічних споруд (греблі, дамби, меліоративні канали).

Ключові слова: землеустрій; інженерно-геодезичні роботи; числові відмітки; лінія нульових робіт

Вступ

Відомо, що землеустрій передбачає роботи з обстеження, вишукування, топографічно-геодезичного спрямування та проектування, що виконуються з метою складання відповідної проектної документації (Kuhlmann, Schwieger, Wieser, & Niemeier, 2014; Войтенко, Третяк, & Шульц, 2011).

Мета землеустрою полягає в забезпеченні раціонального використання та охорони земель,

створенні сприятливого екологічного середовища та поліпшення природних ландшафтів (Земельний кодекс України, 2001; Про землеустрій, 2003). Визначення території і вибір земель для потреб будівництва мостів здійснюється відповідно до затвердженої містобудівної документації з урахуванням планів земельно-господарського устрою.

Мости є унікальними і складними спорудами, які повинні виконувати свої функції не ме-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ніше ніж сто років. Тому дуже важливим питанням залишається надійність таких споруд. Головною умовою надійності конструкції є точність монтажу її елементів, на що впливає передусім точність геодезичних вишукувань.

Інженерно-геодезичні роботи є невід'ємною частиною будівельно-монтажних робіт, які дають змогу контролювати якість будівництва і забезпечують безаварійну експлуатацію мостів.

Проведення монтажних-геодезичних робіт при будівництві мостів супроводжується точними геодезичними вимірюваннями (рис. 1). Принципова схема проведення цих вимірювань повинна відповідати загальному геодезичному правилу послідовного виконання робіт на окремих етапах монтажу.



Рис. 1. Процес геодезичних вимірювань

Підготовчий етап монтажних робіт:

- побудова вихідної основи з розміткою;
- вибір і закріплення монтажних осей;
- перевірка відповідності положення опорних поверхонь і основних деталей споруд проектним вимогам, а у випадку відхилення доводять їх до проектних розмірів і рівнів.

Монтаж будівельної конструкції – послідовне встановлення згідно з проектом несучих елементів будинків і споруд.

Монтаж будівельної конструкції – послідовне встановлення згідно з проектом несучих елементів будинків і споруд.

На кожному етапі робіт проводиться виконавче геодезичне знімання, що відображає фактичне положення змонтованих елементів і регулює процес монтажу для досягнення необхідної точності.

У процесі виконання робіт можуть здійснюватися спостереження за деформаціями конструкцій і обладнання з метою коректування їх положення.

Для монтажу будівельних конструкцій іноді доцільно користуватися не проектними осями, а лініями, паралельними осям і площинам розташування конструкцій чи обладнання. При цьому враховують можливість використання їх для періодичного вивірення агрегатів у процесі експлуатації і спостережень за деформаціями. Крім того, розташування паралельних осей повинне забезпечувати зручність проведення вимірювань, встановлення приладів і обладнання, користування встановленими шаблонами і пристосуваннями (Баран, 2012; ДБН В.1.3-2:2010, 2010; ДСТУ-НБВ.1.3.-1:2009, 2010).

В процесі будівництва, як правило, виконують такі геодезичні роботи: визначення довжини переходу, контрольні вимірювання відстані між осями підвалин лівого і правого берега; розбивка та закріплення осей опор; розбивка та закріплення осей регуляційних споруд, підходів, конусів; установка додаткових реперів; додаткові топографічні зйомки в межах будівельного майданчика; розбивка тимчасових під'їзних доріг, будівель, споруд побутового і виробничого призначення тощо (Баран, 1990; ДСТУ-Н Б В.2.3-34:2016, 2017; Чмчян, 1988).

Мета

Мета роботи – постановка та вирішення проблем землеустрою та нормування точності інженерно-геодезичних робіт на етапах проектування та будівництва мостів. При цьому буде застосовано метод проєкцій з числовими позначками та розглянуто особливості визначення лінії нульових робіт при проектуванні земляного полотна, а також побудови профілю топографічної поверхні.

Методика

При проектуванні й будівництві мостів необхідно розв'язати загально прийняті інженерно-геодезичні завдання, а саме геодезичні мережі – одержати вихідні дані при розробленні проектів будівництва інженерних споруд; розмічувальні роботи – визначити на місцевості положення контурів об'єкта відповідно до проекту; винесення проекту в натуру – забезпечити в процесі будівництва геометричні форми і параметри елементів об'єкта відповідно до проекту; встановлення і вивірення – визначити відхилення геометричних елементів і розмірів зведеного об'єкта від проектних; спостереження

деформацій – вивчити деформацію земної поверхні під спорудами, самої споруди або її частин під дією природних, технологічних та антропогенних факторів (Баран, 2012; ДБН В.1.3-2:2010, 2010; ДБН А.2.1-1-2014, 2014).

В процесі землеустрою і проектування в будівництві вирішується питання розташування споруди мосту на конкретній місцевості, для чого необхідна інформація про її рельєф. Незакономірна форма поверхні землі не дає можливості її зображення в звичайних ортогональних проекціях на взаємно перпендикулярних площинах, а також в аксонометрії та в перспективі. Основним зображенням є горизонтальна проекція, на якій показують окремі точки, розташовані на певній висоті, та лінії, що з'єднують точки з однаковою висотою.

Розглянемо побудовання меж земляних робіт укосів горизонтального полотна дороги.

Перш ніж виконувати побудову потрібно з'ясувати, який тип укосів примикає до полотна дороги. Укоси бувають двох типів: укоси насипу і укоси виїмки. В укосах насипу числові позначки точок по мірі віддаленості від дороги зменшують свої величини, а в укосах виїмки навпаки, збільшують свої величини. Визначити тип укосів потрібно таким чином. Відмічаємо точку перетину крайньої справа горизонталі земної поверхні з числовою позначкою 23 із бровкою споруди (дороги). Оскільки полотно дороги в цьому місці повинно мати числову позначку 20, а земна поверхня має більшу числову позначку, то для спорудження дороги землю потрібно забирати, а отже, справа на плані до дороги примикає укіс виїмки. Тепер візьмемо крайню зліва точку перетину горизонталі земної поверхні з числовою позначкою 17 із бровкою дороги. Оскільки дорога в цьому місці повинна мати також числову позначку 20, а земна поверхня має меншу числову позначку, то для спорудження дороги землю потрібно підсипати, а отже, зліва на плані до дороги примикає укіс насипу.

Звідси логічно випливає, що на бровці дороги повинна бути точка, в якій укіс виїмки переходить в укіс насипу і навпаки. Зрозуміло, що це точка перетину бровок дороги із земною поверхнею. На рис. 4 дані точки позначені літерами А і Б. Точки А і Б називають точками нульових робіт. Отже, визначення точок нульових робіт таке – це точки перетину ліній контуру

споруди із земною поверхнею. В цих точках ніяких земляних робіт не виконують, укіс виїмки переходить в укіс насипу і навпаки.

Визначивши точки А і Б нульових робіт, в укосах виїмки проводимо смуги під кювети (рис. 2), до яких вже будуть прилягати укоси виїмки.

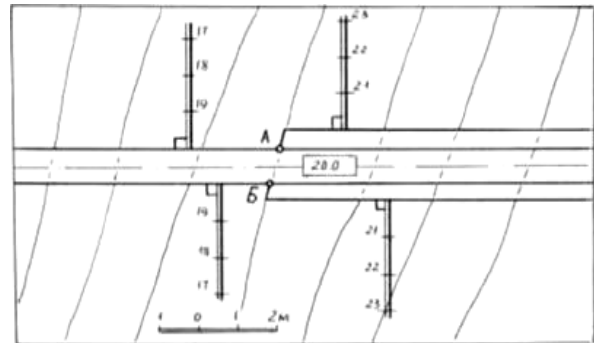


Рис. 2. Визначення точок нульових робіт та типів укосів

Кювети виконують з метою відводу води з укосів виїмки, наприклад під час дощу, щоб вода не потрапляла на полотно дороги.

На рис. 2 в межах плану маємо, що до полотна дороги з двох боків примикають два укоси насипу і два укоси виїмки. В кожному укосі проводимо ЛНУ (лінію найбільшого ухилу) перпендикулярно до бровки дороги в укосах насипу і до лінії контуру кювету в укосах виїмки. Потім градуємо ЛНУ площин.

Оскільки нахил всіх укосів 1:1, то відстань між цілочисельними значеннями числових позначок ЛНУ (інтервал ЛНУ) буде складати 1 м (див. рис. 2).

Завершальний етап побудов показано на рис. 3.

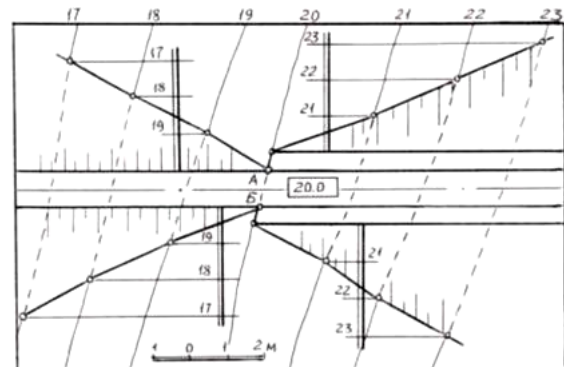


Рис. 3. Визначення меж земляних робіт укосів

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Через точку ЛНУ з цілими числовими позначками проводимо відповідні горизонталі укосів, тобто градуюємо укоси насипу та виїмки. Далі для визначення лінії перетину укосів із землею поверхнею знаходимо точки перетину горизонталей укосів із горизонталями земної поверхні, що мають однакові числові позначки. Через отримані точки проводимо плавну лінію або з'єднуємо спільні точки відрізками ламаної лінії і проводимо дані лінії в точки нульових робіт. Для укосів виїмки ці точки перемістилися на смугу кювету. Лінії перетину земляних укосів із землею поверхнею називають межами земляних робіт. Для укосів виїмки верхньою кромкою є межа земляних робіт, а для укосів насипу – лінія контуру споруди, до якої примикає укіс насипу (Кривцов & Деєв, 1992).

За методом проєкцій з числовими позначками досліджено особливості визначення лінії нульових робіт при проектуванні земляного полотна (рис. 4), якщо ухил земляного полотна заданий графічно, а ухили укосів насипу та виїмки 1:1. Для спрощення на ділянці виїмки водовідвідні канали не показані.

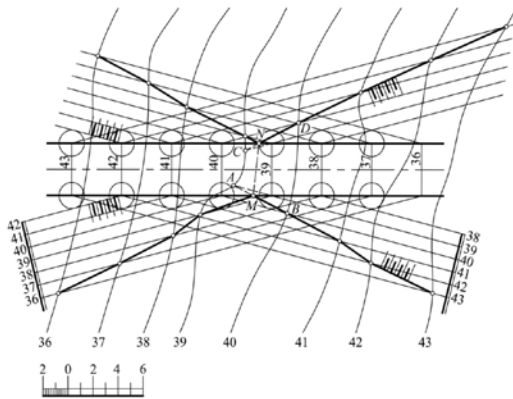


Рис. 4. Визначення лінії нульових робіт

Аналіз розташування горизонталей на плані місцевості та горизонталей земляного полотна показує, що в лівій частині треба влаштувати насип, а в правій – виїмку. Місце нульових робіт, очевидно, буде між 39 та 40 горизонталями. Отже, для визначення положення лінії нульових робіт досить знайти точки перетину брівок земляного полотна з топографічною поверхнею. Для цього через ці прямі (брівки) треба провести площини укосів. Лінії перетину південного укоса виїмки з топографічною поверхнею між горизонталями 39 та 40 AB та північного – CD перетинають брівки відповідно в то-

чках M та N (див. рис. 4, 5). Ці точки і визначають положення лінії нульових робіт.

Побудовання профілю А-А топографічної поверхні двома способами.

Топографічну поверхню розтинають вертикальною площиною А-А, а потім суміщають її з площиною рівня у напрямку А-А і безпосередньо на ній будують профіль. Для цього з точок перетину горизонталей з вертикальною площиною проводять перпендикуляри і на них у масштабі рисунка відкладають висоту цих точок над площиною рівня (в даному випадку площина рівня прийнята на відмітці 10).

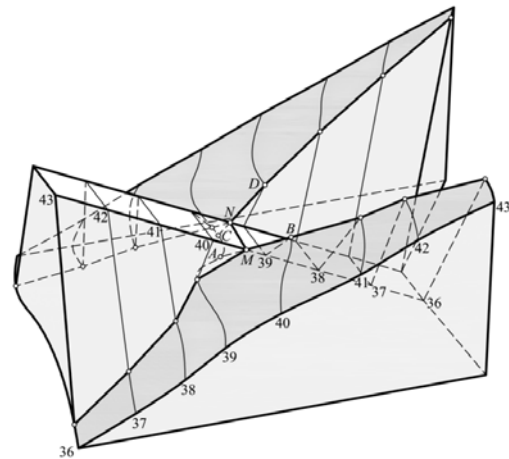


Рис. 5. Наочне зображення укосів

Кінці перпендикулярних відрізків з'єднують відрізками прямих. Отримана лінія і буде профілем місцевості в заданому напрямку (рис. 6).

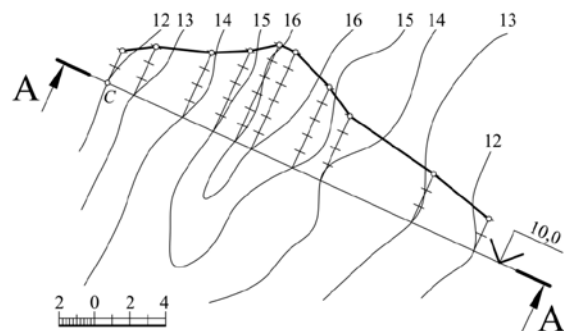


Рис. 6. Побудова профілю А-А

Такий спосіб побудови профілю досить простий, але при насиченості рисунка різними деталями та складності рельєфу місцевості ускладнює аналіз креслення. Тому досить часто, особливо при проектуванні залізниць та автомобільних шляхів, так звані поперечні профілі, які будуються на кожному пікеті та на характерних

точках траси, виконують на окремих аркушах. Не вдаючись до подробиць оформлення таких профілів в реальних проектах, покажемо принцип їх побудови.

На вільному полі креслення, або на окремому аркуші проводять горизонтальну лінію, яку називають основою або базою профілю, їй присвоюють найменшу відмітку, що є на заданому напрямку, або на 1-2 м менше (в нашому випадку, як і на рис. 3, за базову прийнята відмітка 10). Зліва проводять вертикальну лінію і на ній в масштабі рисунка відкладають відрізки, рівні перевищенню в 1 м, і точкам поділу присвоюють відповідні відмітки. Через ці точки проводять горизонтальні прямі, які відповідають горизонталям рельєфу (рис. 7).

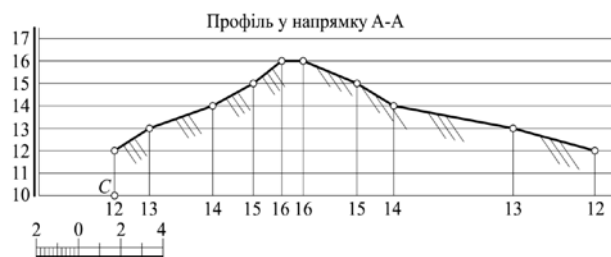


Рис. 7. Побудова профілю А-А(другий спосіб)

На базовій горизонтальній прямій вибирають довільну точку (С) і від неї відкладають відстані між точками перетину вертикальної площини А-А з горизонталями місцевості. Це можна зробити за допомогою циркуля, або складеного вдвоє папірця відповідної довжини (папірець ребром згину прикладають до рисунка місцевості по лінії А-А і на ньому відмічають відповідні точки перетину з горизонталями, а потім переносять їх на базову горизонталь профілю).

Під точками, перенесеними на базову горизонталь, підписують відповідні відмітки. З цих точок проводять вертикальні лінії до перетину з відповідними горизонталями. Якщо з'єднати точки перетину цих ліній з горизонталями відрізками прямих, то будемо мати профіль в заданому напрямі А-А.

Як показали дослідження всі ці методи мають ряд переваг, але слід відмітити такий недолік, як недостатня наочність зображення, а також необхідність у деяких випадках доповнити основне зображення вертикальними перерізами (так званими профілями).

Наукова новизна та практична значимість

Встановлені основні переваги методу проєкцій з числовими відмітками, а саме простота в побудові зображення об'єкта, що обумовлено застосуванням ортогонального проєктування об'єкта тільки на одну площину проєкцій, також доведена зручність у визначенні висотних розмірів об'єкта, поданих у вигляді числових відміток його характерних точок, що дає можливість на основі даних інших геодезичних вишукувань виконувати проєктування земляного полотна з високою точністю.

Висновки

1. Встановлено, що під час землеустрою та геодезичних вишукувань доцільно використовувати метод проєкцій з числовими позначками для зображення рельєфу місцевості, що дозволяє виконувати інженерно-геодезичну розвідку і планувати розміщення споруд мостів.

2. Доведено, що значну увагу при проєктуванні слід приділяти питанню оптимального визначення лінії нульових робіт.

3. Визначено, що для зручності аналізу креслення слід топографічні розрізи проєктувати в такий спосіб, щоб його зображення було розміщено у вільному полі креслення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Kuhlmann, H., Schwieger, V., Wieser, A., & Niemeier, W. (2014). Engineering Geodesy – Definition and Core Competencies. *Journal of Applied Geodesy*, 8(4), 327-334.
- Баран, П. И. (1990). *Геодезические работы при монтаже и эксплуатации оборудования*. Москва: Недра.
- Баран, П. И. (2012). *Інженерна геодезія*. Київ: ПАТ «ВПІОЛ».
- Войтенко, С., Третяк, К., & Шульц, Р. (2011). Перспективи розвитку інженерної геодезії в Україні. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, II(22), 24-27.
- ДБН А.2.1-1-2014 (2014). *Інженерні вишукування для будівництва*. Київ: Мінрегіонбуд України.
- ДБН В.1.3-2:2010 (2010). *Геодезичні роботи у будівництві*. Київ: Мінрегіонбуд України.
- ДСТУ-Н Б В.1.3.-1:2009 (2010). *Виконання вимірювань, розрахунків та контроль точності геометричних параметрів*. Київ: Мінрегіонбуд України.
- ДСТУ-Н Б В.2.3-34:2016 (2017). *Настанова з виконання робіт при будівництві мостів та труб*. Київ: Мінрегіонбуд України.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Кривцов, В. В., & Дєєв, С. С. (1992). *Нарисна геометрія: Навчальний посібник*. Київ: НМК ВО. 22.05.2003 р. (2003).
- Земельний кодекс України. Закон України № 2768 від 25.10.2001 р. (2001). Чмчян, Т. Т. (1988). *Расчет точности геодезических работ в строительстве: справочник*. Москва: Недра.
- Про землеустрій. Закон України № 858 від

А. Н. ПШИНЬКО¹, А. В. КРАСНЮК², Е. В. ГРОМОВА³,
А. С. ЩЕРБАК^{4*}, Т. В. СТАРОСОЛЬСКАЯ⁵

¹ Кафедра «Управление проектами, здания и строительные материалы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 46, эл. почта pshinko@mail.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1598-2970

² Кафедра «Графика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. + 38(056) 373 15 59, эл. почта krasnyuk@mail.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1400-9992

³ Кафедра «Управление проектами, здания и строительные материалы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. + 38 (056) 373 15 46, эл. почта elenagromova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5149-4165

^{4*} Кафедра «Графика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (067) 586 45 74, эл. почта pro-f@ukr.net, ORCID 0000-0003-1340-0284

⁵ Кафедра «Графика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. + 38 (066) 791 35 94, эл. почта simatn777@gmail.com, ORCID 0000-0002-3851-9612

ВОПРОСЫ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА И ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОСТОВ

Цель. Цель работы – постановка и решение проблемы землеустройства и нормирования точности инженерно-геодезических работ на этапах строительства мостов. По методу проекций с числовыми отметками определить основные работы при проектировании земляного полотна, построение профиля топографической поверхности. **Методика.** По методу проекций с числовыми отметками рассмотрим определение линии нулевых работ при проектировании земляного полотна, если уклон земляного полотна заданный графически. Построение профиля топографической поверхности двумя способами. **Результаты.** В процессе проектирования в строительстве решается вопрос расположения сооружения моста на конкретной местности, для чего необходима информация о ее рельефе. Форма поверхности земли не дает возможности ее изображения в обычных ортогональных проекциях на взаимно перпендикулярных плоскостях, а также в аксонометрии и перспективе. Основным изображением является горизонтальная проекция, на которой говорят отдельные точки, расположенные на определенной высоте, и линии, соединяющие точки с одинаковой высотой. **Научная новизна.** Установлены основные преимущества метода проекций с числовыми отметками: а именно простота в построении изображения объекта, что обусловлено использованием ортогонального проектирования объекта только на одну плоскость проекций; также доказано удобство в определении высотных размеров объекта, поданных в виде числовых отметок его характерных. **Практическая значимость.** В геодезии с помощью метода проекций с числовыми отметками изображают рельеф местности, что позволяет выполнять инженерно-геодезическую разведку и разбивку сооружений. Этот метод используют также для изображения и проектирования на земной поверхности различных транспортных сооружений (мосты, тоннели, путевые эстакады) и гидротехнических сооружений (плотины, дамбы, мелиоративные каналы).

Ключевые слова: землеустройство; инженерно-геодезические работы; числовые отметки; линия нулевых работ

А. N. PSHINKO¹, А. V. KRASNYUK², О. V. GROMOVA³,
А. S. SHCHERBAK^{4*}, Т. V. STAROSOLSKAYA⁵

¹ Department "Project management, buildings and building materials", Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 46, e-mail pshinko@mail.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1598-2970

² Department "Graphics", Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373-15-38, e-mail krasnyuk@mail.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2354-7765

³ Department "Project management, buildings and building materials", Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38(056) 373 15 46, e-mail elenagromova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5149-4165

^{4*} Department "Graphics", Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 586 45 74, e-mail pro-f@ukr.net, ORCID 0000-0003-1340-0284

⁵ Department "Graphics", Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (066) 791 35 94, e-mail simatn777@gmail.com, ORCID 0000-0002-3851-9612

THE ISSUES OF LAND AND GEODETIC SURVEYS FOR THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF BRIDGES

Purposes. The aim of this work is the formulation and solution of the problem of regulation precision engineering-geodetic works on the construction stages of bridges. By the method of projections with numerical marks to determine the line of zero work in the design of the earth-sway, the construction of the profile of the topographic surface. **Methodology.** According to the method of projections with numerical marks, we consider the definition of the line of zero work in the design of the subgrade, if the slope of the subgrade is given graphically. Construction of a profile of a topographic surface in two ways. **Findings.** In the process of design in the construction of the question of the location of the bridge on a specific location, which requires information about its topography. The irregular shape of the earth's surface makes it impossible to depict it in normal orthogonal projections on mutually perpendicular areas, as well as in axonometry and perspective. The main image is a horizontal projection, where individual points located at a certain height and lines connecting points with the same height are spoken. **Originality.** The main advantages of the method of projections with numerical marks: easy to build an image of the object (the simplest method of projection – orthogonal design of the object on only one plane of the projections); convenience in determining the height dimensions of the object, filed in the form of numerical marks of its characteristic points and the relative ease of solving metric problems. The disadvantages include the lack of visibility of the image, as well as the need in some cases to Supplement the main image with vertical sections /so-called profiles. **Practical value.** In geodesy, using the method of projections with numerical marks, the terrain is depicted, which allows performing engineering and geodetic exploration and breakdown of structures. This method is also used for the image and design on the earth's surface of various reclamation and hydraulic structures (dams, dams, embankments, pits, artificial and regulatory structures, reclamation channels) and engineering structures (pits, construction sites, bridges, tunnels, track overpasses).

Keywords: land management; geodetic engineering works; the numerical mark; the line of zero works

REFERENCES

- Kuhlmann, H., Schwieger, V., Wieser, A., & Niemeier, W. (2014). Engineering Geodesy – Definition and Core Competencies. *Journal of Applied Geodesy*, 8(4), 327-334. (in English)
- Baran, P. I. (1990). *Geodezicheskie raboty pri montazhe i jekspluatacii oborudovanija*. Moskva: Nedra. (in Russian)
- Baran, P. I. (2012). *Inzhenerna heodeziia*. Kyiv. PAT «VIPOL». (in Ukrainian)
- Vojtenko, S., Tretjak, K., & Shul'c, R. (2011). Perspektivi rozvitku inzhenernoї geodezii v Ukraїni. *Suchasni dosjagnennja geodezichnoї nauki ta virobництва*, II(22), 24-27. (in Ukrainian)
- DBN A.2.1-1-2014 (2014). *Inzhenerni vyshukuvannia dlia budivnytstva*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DBN V.1.3-2:2010 (2010). *Heodezychni roboty u budivnytstvi*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU-N B V.1.3.-1:2009 (2010). *Vykonannia vymiriuvan, rozrakhunok ta kontrol tochnosti heometrychnykh parametriv*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU-N B V.2.3-34:2016 (2017). *Nastanova z vykonannia robit pry budivnytstvi mostiv ta trub*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Krivtsov, V. V., & Dieiev, S. S. (1992). *Narysna heometriia: Navchalnyi posibnyk*. Kyiv: NMK VO. (in Ukrainian)
- Zemelnyi kodeks Ukrainy. Zakon Ukrainy № 2768 vid 25.10.2001 r. (2001). (in Ukrainian)
- Pro zemleustrii. Zakon Ukrainy № 858 vid 22.05.2003 r. (2003). (in Ukrainian)
- Chmchjan, T. T. (1988). *Raschet tochnosti geodezicheskikh rabot v stroitel'stve: spravochnik*. Moskva: Nedra. (in Russian)

Надійшла до редколегії 27.05.2019.

Прийнята до друку 04.06.2019.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 352/354-043.86

П. П. ТЕСЛЕНКО^{1*}, О. А. БОНДАР²,
В. О. ПОКОЛЕНКО³, І. М. ЯКИМЧУК⁴, О. М. ХОМЕНКО⁵

^{1*} Кафедра менеджменту в будівництві, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, ел. пошта nkc_kiev@ukr.net

² Кафедра менеджменту в будівництві, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, ел. пошта alenka_bon@i.ua, ORCID 0000-0002-4633-6859

³ Кафедра менеджменту в будівництві, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, ел. пошта nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0003-1750-5964

⁴ Кафедра менеджменту в будівництві, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, ел. пошта nkc_kiev@ukr.net

⁵ Кафедра менеджменту в будівництві, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, ел. пошта nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0002-6242-4736

ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ДЕВЕЛОПМЕНТУ МУНІЦИПАЛЬНИХ БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЕКТІВ

Мета. Розробка інструментарію, який надає організаційно-технологічне та організаційно-структурне обґрунтування циклу муніципальних будівельних проектів (МБП) як специфічних об'єктів будівництва та інвестування, що готуються і впроваджуються муніципальною владою для розв'язання нагальних інфраструктурних, комунальних, екологічних та соціальних проблем життєдіяльності міст України. **Методика.** Застосовано інструментарій організаційно-технологічного девелопменту муніципальних будівельних проектів як організаційно-структурного, адміністративного та операційно-технологічного засіб їх підготовки та впровадження, адаптованого до змісту характеристик життєвого циклу та особливостей адміністрування цих проектів у форматі спеціальної девелоперської оргструктури, яка започаткована та діятиме як тимчасова функціонально-адміністративна група. **Результати.** На підставі досліджень було з'ясовано, що при реалізації муніципальних масштабних будівельних проектів соціального призначення проблема девелопменту поглиблюється необхідністю з боку муніципальної влади пошуку девелоперської компанії. Специфіка МБП як будівельних проектів (значна тривалість, технічна та технологічна складність, змішане функціональне призначення, значна інвестиційна ємність тощо) дала підстави обґрунтувати організаційно-управлінський та функціонально-технологічний базис системи будівельного девелопменту для зазначених проектів. **Наукова новизна.** Вперше виконане оновлення системи будівельного девелопменту для проектів змішаного призначення на основі сполучення підходів багатокритеріального ресурсно-календарного планування з методологічними платформами, які застосовуються в організації будівництва, девелопменті та сучасній практиці управління підприємствами. **Практична значимість.** Виконавчим органам міської влади для потреб реалізації складаних та інвестиційно-ємних проектів змішаного призначення надано потужний інструментарій формалізованого моделювання та вибору варіантів організації циклу МБП разом з практичними рекомендаціями щодо організаційно-управлінської реалізації таких проектів у вигляді тимчасових адміністративних груп (дирекцій).

Ключові слова: муніципальний будівельний проект (МБП); інструментарій організаційно-технологічного девелопменту МБП; тимчасова оргструктура адміністрування МБ; девелопмент; операційна діяльність

Вступ

В умовах триваючої стагнації будівельного галузі продуктивним для неї шляхом виходу з кризи є реалізація масштабних будівельних проектів із залученням широкого кола інституційних учасників – муніципальної влади та

приватних (в т.ч. закордонних) інвесторів. Такі проекти сприятимуть як поліпшенню стану будівельної галузі в якості інтегратора створення нової функціонуючої вартості у вигляді черги будівельних об'єктів, так і для муніципальної влади, яка стикається з складно вирішуваними в даних умовах завданнями модернізації міського господарства та інфраструктури, а також

для міського населення як споживача продукту зазначених проєктів.

На порядок денний виходить низка проблем щодо започаткування цільового задуму муніципального будівельного проєкту (МБП) та наступного організаційно-управлінського, адміністративного, функціонального, техніко-технологічного та інвестиційного обґрунтування рішень. Зазначені рішення мають на меті забезпечити:

1) для замовника (та майбутніх споживачів продукту проєкту) – забезпечення функціональних цілей МБП та реалізацію проєкту у відведеному організаційно-технологічному та ресурсно-часовому форматі (згідно календарного плану, зведеного кошторису та бюджету МБП);

2) для співінвесторів та кредиторів проєкту – впевненість у забезпеченні фінансової та виконавчої дисципліни з боку провідних учасників проєкту, щоб забезпечити задоволення їх комерційних інтересів після успішної реалізації проєкту та надійність функціонування їх виробничо-операційних систем на такому специфічному сегменті ринку інвестування як інвестування МБП;

3) для девелопера – адаптований до умов специфічного середовища реалізації МБП надійний інструмент організаційно-технологічного моделювання, оцінки та вибору альтернатив організації будівництва, який надасть йому належну спроможність змодельовати, розраховувати характеристики та обрати варіанти – щодо організації циклу «підготовка-будівництво-введення в дію потужностей проєкту»;

4) для потреб замовника, девелопера та інших провідних організацій-учасників – сформулювати дієву оргструктуру будівельного девелопменту, яка було б спроможна обрати надійне коло організацій-виконавців та надалі здійснювати успішне адміністрування цілісного циклу МБП на всіх фазах, стадіях та роботах життєвого циклу проєкту зазначеного типу.

Мета

Ординарні підходи в організації будівництва є принципово неприйнятними для умов реалізації таких проєктів через їх значну інвестиційну ємність, переважно некомерційний характер та, як наслідок, значні адміністративні, організаційні та інші труднощі залучення приватних

інвесторів, в т.ч. закордонних. Таким чином, досягнення мети обґрунтування інструментарію організації будівництва для МБП, що має реалізовуватись в системі організаційно-технологічного девелопменту єдиного проєктного циклу, слід визнати як нагальне науково-методичне та прикладне завдання, яке потребує вирішення та, в свою чергу, визначає актуальність досліджень, які представлено в даній статті.

Методика

Представлені в статті дослідження спрямовувались на розробку інструментарію організаційно-технологічного девелопменту муніципальних будівельних проєктів як організаційно-структурного, адміністративного та операційно-технологічного засобу їх підготовки та впровадження, адаптованого до змісту характеристик життєвого циклу та особливостей адміністрування цих проєктів у форматі спеціальної девелоперської оргструктури, яка започаткована та діятиме як тимчасове функціонально-адміністративне угруповання.

На підставі досліджень було з'ясовано, що при реалізації муніципальних масштабних будівельних проєктів соціального призначення проблема девелопменту поглиблюється необхідністю з боку муніципальної влади пошуку такої девелоперської компанії, яка має не лише здійснити підготовку та управління проєктом (функціонально-технологічне, технічне, адміністративне та бюджетне) на всіх фазах, стадіях і роботах проєкту, але й здійснити пошук зацікавлених співінвесторів для реалізації проєкту. Це визначає практичну передумову дослідження.

Аналіз напрацювань з організації будівництва та будівельного девелопменту (Kensek, & Noble, 2014; Бондар, & Кочедикова, 2015; Кістіон, 2017; Коростелев, 2009; Котляров, 2018; Мазур, Шапиро, & Ольдерогге, 2004; Пейзер, & Фрей, 2003) дозволив виокремити «організаційно-технологічний девелопмент для МБП» як специфічний різновид системи організації будівництва в сучасних умовах.

На підставі аналізу джерел було надано дефініцію МБП як специфічного будівельного проєкту: «Муніципальний будівельний проєкт – це проєкт інфраструктурного, соціального чи змішаного призначення, що започатковується муніципальною владою для вирішення невід-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

кладних завдань вдосконалення процесів життєдіяльності міського господарства (масштабні проекти оновлення комунальної і транспортної інфраструктури, масштабні транспортні проекти, проекти територіальної ревіталізації, в т.ч. колишніх промислових зон) і реалізація яких ускладнюється як різноманітністю призначення об'єктів будівництва (реконструкції, ревіталізації), що визначені як черги будівництва (функціональні етапи) в складі цілісної інвестиційно-будівельної програми, так і складністю інвестування зазначених інвестиційно-ємних проектів за рахунок коштів муніципального бюджету». Зазначені функціональні особливості МБП як будівельного об'єкту та об'єкту інвестування потребують створення адаптованої до особливостей зазначених проектів – системи організаційно-технологічного девелопменту МБП (Тесленко, 2017; Тесленко, 2018).

Прийнята робоча гіпотеза визначила, що головні зусилля в організації втілення проектів типу МБП, що обрані як об'єкти досліджень, мають бути зосереджені на формуванні спеціальної оргструктури управління будівельним проектом у вигляді тимчасової дирекції, яка має діяти як багато ешелонувана структура загального девелопменту проекту, з розгалуженими за принципом мережевої структури мобільними командами, які призначені забезпечити функціонально-організаційну, технічну, технологічну структуру проекту, забезпечити пошук співінвестора та компанії-девелопера (провідного виконавця), розподіл відносин власності та відповідальності в проекті та, надалі, успішне впровадження проекту. Гіпотезою визначено, що оргструктура МБП має діяти як девелоперська структура універсального типу, яка приймає на себе відповідальність за підсумки управління проектом впродовж всього проектного циклу.

На підставі досліджень обґрунтовано, що в основу створеного інструментарію оновлення будівельного девелопменту слід покласти синтез прикладних інструментів з організації будівництва, мультикритеріальної оптимізації, будівельного девелопменту та інжинірингу, теорії графів та графічної візуалізації, функціонально-вартісного аналізу, кластерного групування (Мукутас, Тегенчук, & Жургавська, 2018), структурного та процесно-орієнтованого моделювання. В основу організації будівництва для МБП (Поколенко, & Тесленко, 2017) як складо-

вої її життєвого циклу слід використати окремі інституційні, концептуально-методичні та організаційно-адміністративні засади державно-приватного партнерства у форматі концесійної моделі Built Operated and Transfer (BOOT).

Результати

Виокремлена специфіка МБП як будівельних проектів (значна тривалість, технічна та технологічна складність, змішане функціональне призначення, значна інвестиційна ємність тощо) дала підстави обґрунтувати організаційно-управлінський та функціонально-технологічний базис системи будівельного девелопменту для зазначених проектів. Отже, система будівельного девелопменту для МБП, втілена у певній оргструктурі адміністрування, має реалізовувати спеціальні функції:

1) адміністративно-регуляторна функція, яка полягає в забезпеченні комунікацій та в інституційно-організаційному оформленні відносин між інституційними учасниками та виконавцями проекту у вигляді угод, контрактів та функціонуючої дирекції з адміністрування проектом;

2) превентивно-аналітична функція, спрямовує систему девелопменту та оргструктуру управління МБП на завчасне обстеження впливу процесів зовнішнього та внутрішнього мікросередовища реалізації МБП впродовж його життєвого циклу, своєчасне виявлення загроз ходу підготовки та будівництва об'єктів, розробка рекомендацій, організаційно-технічних, адміністративних та економічних заходів щодо їх подолання;

3) управління процесами логістики, підготовки та будівництва – функція, яка спрямована на оперативне управління процесами життєвого циклу МБП в процесі трансформації ресурсів замовника та його інституційних партнерів в проміжну та готову продукцію проекту.

В якості засобу формалізованого та науково виваженого обґрунтування та управління підготовкою та спорудженням будівельних об'єктів в складі муніципальних інвестиційно-будівельних програм, які реалізуються у форматі МБП, обґрунтовано науково-прикладний інструментарій організаційно-технологічного девелопменту зазначених проектів. В складі інструментарію розроблено та обґрунтовано три організаційно-структурні та організаційно-технологічні моделі, комплекс прикладних програм та ряд практичних рекомендацій щодо бу-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

дівельного девелопменту для потреб МБП.

Провідною інновацією інструментарію є розробка функціонально-організаційного регламенту операційної діяльності циклу МБП (табл. 1), який структурує зміст операційної діяльності тимчасової структури підготовки та адміністрування у вигляді проектного циклу, з принципово новим (відповідно до особливостей

МБП) змістом 8 стадій: від стадії ініціації проекту та передінвестиційного девелопменту (перший рядок табл. 1) до завершальної восьмої, стадії – вихід на цільову продуктивність проекту. Будівництво є складовою 7 стадії – формування цільової вартості проекту.

Таблиця 1

Функціонально-організаційний регламент операційної діяльності циклу МБП (фрагмент)

№ з/п	Найменування укрупненої стадії (управлінського та організаційно-технологічного домену) циклу МБП	Поопераційний (поелементний) зміст стадій виконання МБП
1	Ініціація, організація тимчасової дирекції та передінвестиційний девелопмент	Постановка цілей і визначення основної стратегії девелопменту. Дослідження ринку та визначення відповідності місцеположення для реалізації проекту. Передпроектна стадія. Розробка альтернативних комплексних концепцій забудови (відновлення) територій. Початок формування тимчасової дирекції адміністрування МБП.
2	Попередня експертиза проекту експертизи проекту та складання ТЕО	Аналіз попиту і пропозиції можливості реалізації проекту. Аналіз фінансової доцільності розроблених концепцій забудови територій. Проведення попередніх консультацій з органами державного регулювання. Прогнозування вірогідної позиції інших зацікавлених сторін. Визначення вірогідності отримання фінансів.
3	Придбання земельної ділянки у власність (довготривалу оренду)	Пошук і оцінка земельної ділянки. Придбання земельної ділянки (право власності або оренди).
4	Остаточна функціональна, техніко-технологічна, інвестиційна, економічна та екологічна експертиза проекту. Розробка ПКД.	Формування рівнів та підрозділів (команд) в складі оргструктури МБП. Підготовка бізнес-плану проекту. Проектування, розрахунок витрат та оцінювання ефективності. Отримання узгоджень і дозволів від органів державного контролю. Проектування й оцінювання проекту. Внесення змін у проект та отримання завершальних дозволів.
5	Завершення формування адміністративно-управлінського середовища проекту.	Вибір провідного виконавця, субпідрядників та укладення контрактів з ними. Створення системи взаємодії між учасниками реалізації проекту на всіх рівнях дирекції МБП. Укладання контрактів на підготовку, логістику, будівництво, устрій інженерних систем. Створення дієвої системи контролю за процесом реалізації проекту всередині оргструктури. Завершення формування адміністративно-управлінської платформи проекту (тимчасової оргструктури проекту).
6	Організація системи бюджетування МБП та адміністрування потоків надходжень проекту.	Розробка, структурування та узгодження бюджетів та календарних планів проектів. Узгодження схем, формату та графіків інвестування проекту за джерелами. Узгодження графіків та форм інвестування з джерелами та інтенсивністю чистих надходжень проекту. Організаційні заходи із забезпечення інвестиційної та фінансово-економічної безпеки проекту.
7	Формування цільової вартості проекту як техніко-технологічного та маркетингового продукту проекту.	Організаційно-технологічна та технічна підготовка проекту. Підготовка будмайданчика. Визначення технологічних, продуктових, маркетингових та інших віх проекту. Будівництво. Устрій інженерного та технологічного (цільового) обладнання. Діяльність з цільового маркетингу, що супроводжує процес будівництва. Адміністрування потоком надходжень, що супроводжує процес будівництва.
8	Стадія виходу вихід на цільову продуктивність проекту.	Експлуатація проекту до виходу на проекту потужність (ПП). Стратегічна оцінка результатів циклу на момент ПП – для муніципальної влади та ін. інституційних учасників проекту. Завершення (продовження) розрахунків з інституційними партнерами. Продовження реалізації стратегії експлуатаційної фази проекту

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Важливою інновацією інструментарію є рекомендації з пошуку співінвесторів та кредиторів проекту – інституційних партнерів муніципальної влади та пропонувані альтернативні схеми організації кредитування будівельних проектів в процесі організації циклу МБП. Зазначені схеми сполучають переваги: банківського кредитування, ЕКСРОУ-кредитування та кредитування за типом Initial Public Offering.

Спеціальна компонента інструментарію – організаційно-структурна та функціонально-технологічна модель «Модернізований органі-

заційно-структурний формат реалізації муніципальних будівельних проектів через тимчасові адміністративні угруповання» – визначає типологію та змістовні особливості організаційних структур управління (ОСУ) для потреб МБП, спроможних у форматі тимчасової дирекції реалізовувати зазначені проекти протягом цілісного інвестиційного циклу, із стратифікацією презентованих варіантів ОСУ за рівнями – від інституційного рівня (рис. 1) до рівня приоб'єктних структур на будівельних майданчиках.



Рис. 1. Відображення моделі інституційного рівня оргструктури управління МБП у форматі тимчасової дирекції з адміністрування проектом

На підставі зазначеної моделі проектні рішення для структури управління МБП представлені у вигляді тимчасово адміністративного угруповання (дирекції). Вирішено доцільним форматом функціонування такої структури формат наближений до концесійної моделі BOOT у державно-приватному партнерстві. В якості архітектонічного типу побудови такої структури визначено багато ешелонованої тимчасову, структуру, яка на середньому та оперативному рівнях управління сполучає переваги традиційно структурованих підрозділів з мобільними (функціонально-, продуктово- та проектно-орієнтованими) командами. За регламентом

операційної діяльності зазначена тимчасова дирекція МБП є синтетичною структурою (рис. 2), що відображає сучасні тенденції трансформації організаційно-виробничих структур і сполучає ознаки: а) фінансово-інвестиційної компанії; б) девелоперської компанії, що є реалізатором будівельного інфраструктурного проекту; в) проектно-орієнтованої «пілотної» компанії, що працює і як команда, що об'єднує «стратегічні корпоративні напрями» і використовує регламент і правила внутрішньо-фірмової роботи в режимі «стратегічні господарські підрозділи».

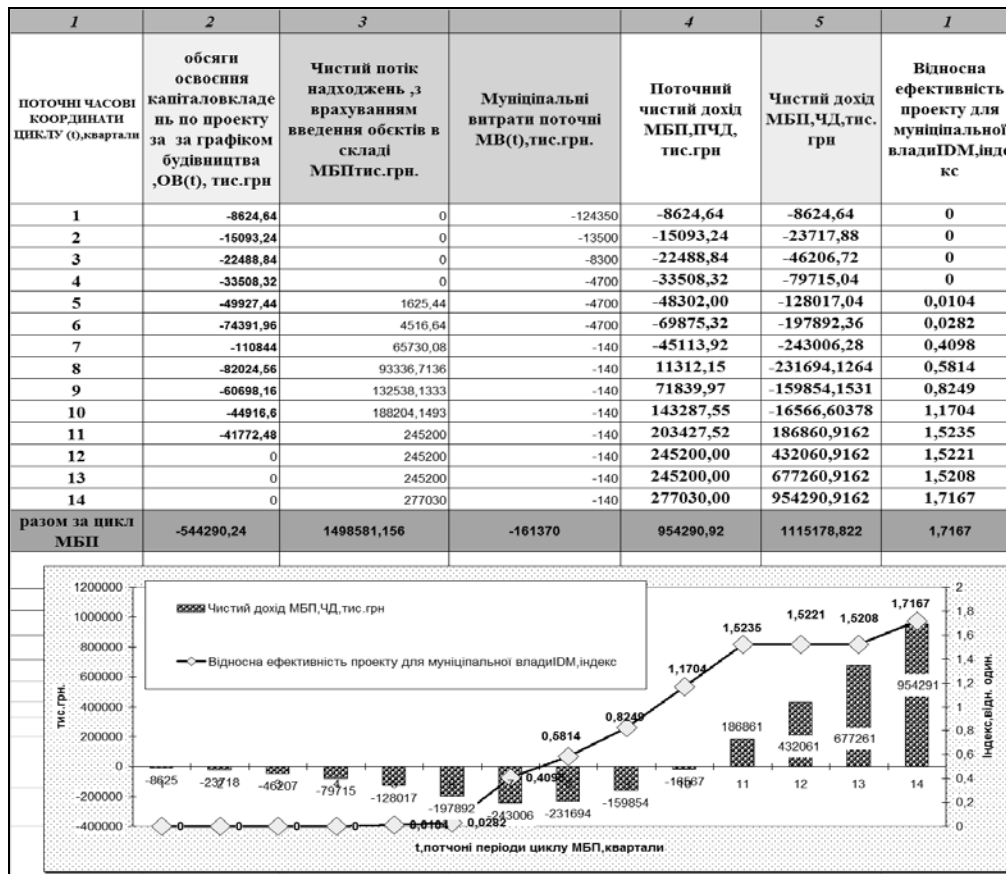


Рис. 2. Результуюча гістограма циклу для МБП, складена підсумковими модулями програмного комплексу

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна результатів представлених досліджень визначається інноваційним змістом моделей (компонент) інструментарію організації системи будівельного девелопменту для МБП. Вперше виконане оновлення системи будівельного девелопменту для проектів змішаного призначення здійснено на основі сполучення підходів багатокритеріального ресурсно-календарного планування з методологічними платформами, які застосовуються в організації будівництва, девелопменті та сучасній практиці управління підприємствами: метод балансу інвестиційних та організаційних критеріїв, галузева теорія управління підприємствами «геометрична економетрика», вдосконалені теоретико-методичні основи адаптогенезу, реінжинірингу у будівництві.

Практична значимість результатів представлених досліджень полягає в тому, що в розпорядження виконавчих органів міської влади для потреб реалізації складаних та інвестиційно-

емних проектів змішаного призначення надано потужний інструментарій формалізованого моделювання та вибору варіантів організації циклу МБП таких проектів разом з практичними рекомендаціями щодо організаційно-управлінського середовища реалізації таких проектів у вигляді тимчасових адміністративних груп (дирекцій).

Висновки

Представлені в статті дослідження є актуалізованою відповіддю на нагальну практичну потребу успішного впровадження муніципальних будівельних проектів як спеціального різновиду об'єктів будівництва та цільового інвестування як проект інфраструктурного, соціального чи змішаного призначення, що започатковується муніципальною владою для вирішення невідкладних завдань вдосконалення процесів життєдіяльності міського господарства.

Для потреб МБП розроблено системне науково-методичного забезпечення у вигляді модернізованого інструментарію будівельного

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

девелопменту (в складі функціональних, організаційно-структурних та організаційно-технологічних компонент), на ґрунті якого буде забезпечено продуктивне моделювання та вибір варіантів життєвого циклу таких проектів, де організація будівництва є невід'ємною складовою.

Науково-методичні результати досліджень, представлених в даній статті, було інтегровано та втілено у комплекс прикладних програм ДМБП («Девелопмент муніципальних будівельних проектів»). Результати впровадження роботи в практику підготовки та впровадження значних міських будівельних проектів довели, що програмний комплекс ДМБП слід оцінити як потужну сучасну аналітичну основу підготовки та ухвалення інституційними учасниками масштабних будівельних проектів основних управлінських віх, ресурсно-календарного плану, оргструктури та бюджету впровадження проекту, в якому організація будівництва є невід'ємною складовою цілісного циклу МБП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Kensek, K., & Noble, D. (2014). *Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley.
- Mykytas, M., Terenchuk, S., & Zhuravska, N. (2018). Models, Methods and Tools of Optimizing Costs of Development of Clusterized Organizational Structures in Constructing Industry. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 250-254.
- Бондар, О. А., & Кочедикова, А. С. (2015). Удосконалення організаційно-економічної моделі інноваційної діяльності підприємства. *Управління розвитком складних систем*, 25(1), 75-77.
- Кістюн, В. Є. (2017). Інноваційні моделі реструктуризаційних процесів інфраструктурних підприємств. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 12, 19-28.
- Коростелев, С. П. (2009). *Теория и практика оценки для целей девелопмента и управления недвижимостью*. Москва: Маросейка.
- Котляров, М. А. (2018). *Основы девелопмента недвижимости*. Москва: Юрайт.
- Мазур, И. И., Шапиро, В. Д., & Ольдерогге, Н. Г. (2004). *Девелопмент*. Москва: Экономика.
- Пейзер, Р. Б., & Фрей, А. Б. (2003). *Профессиональный девелопмент недвижимости*. Вашингтон: Институт городских земель.
- Поколенко, В. О., & Тесленко, П. П. (2017). Застосування імперативів ТАQM для модернізації топології будівельних девелоперських контрактів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 36(2), 171-178.
- Тесленко, П. П. (2017). Організаційно-технологічний інструментарій муніципальних проектів в будівництві. *Управління розвитком складних систем*, 29(2), 134-142.
- Тесленко, П. П. (2018). Нормативно-правові механізми удосконалення будівельного девелопменту. *Управління розвитком складних систем*, 30 (2), 149-154.

П. П. ТЕСЛЕНКО^{1*}, Е. А. БОНДАРЬ²,
В. О. ПОКОЛЕНКО³, И. Н. ЯКИМЧУК⁴, А. М. ХОМЕНКО⁵

^{1*} Кафедра менеджмента в строительстве, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект, 31, Киев, Украина, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, эл. почта nkc_kiev@ukr.net

² Кафедра менеджмента в строительстве, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект, 31, Киев, Украина, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, эл. почта alenka_bon@i.ua, ORCID 0000-0002-4633-6859

³ Кафедра менеджмента в строительстве, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект, 31, Киев, Украина, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, эл. почта nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0003-1750-5964

⁴ Кафедра менеджмента в строительстве, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект, 31, Киев, Украина, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, эл. почта nkc_kiev@ukr.net

⁵ Кафедра менеджмента в строительстве, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект, 31, Киев, Украина, 03680, тел. +38 (044) 241 54 98, эл. почта nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0002-6242-4736

ИННОВАЦИОННЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ДЕВЕЛОПМЕНТА МУНИЦИПАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ

Цель. Разработка инструментария, который предоставляет организационно-технологическое и организационно-структурное обоснование цикла муниципальных строительных проектов (МСП) как специфических объектов строительства и инвестирования, готовящихся и внедряющихся муниципальной властью для решения неотложных инфраструктурных, коммунальных, экологических и социальных проблем жизнедеятельности городов Украины. **Методика.** Применен инструментарий организационно-технологического развития муниципальных строительных проектов как организационно-структурного, административного и операционно-технологического средства их подготовки и внедрения, адаптированного к содержанию характеристик жизненного цикла и особенностей администрирования этих проектов в формате специальной девелоперской оргструктуры, которая основана и будет действовать как временная функционально административная группа. **Результаты.** На основании исследований было выяснено, что при реализации муниципальных масштабных строительных проектов социального назначения проблема девелопмента углубляется необходимостью со стороны муниципальных властей поиска девелоперской компании. Специфика МСП как строительных проектов (значительная продолжительность, техническая и технологическая сложность, смешанное функциональное предназначение, значительная инвестиционная емкость и т.д.) дала основания обосновать организационно-управленческий и функционально-технологический базис системы строительного девелопмента для указанных проектов. **Научная новизна.** Впервые выполнено обновление системы строительного девелопмента для проектов смешанного назначения на основе сочетания подходов многокритериального ресурсно-календарного планирования с методологическими платформами, которые применяются в организации строительства, девелопменте и современной практике управления предприятиями. **Практическая значимость.** Исполнительным органам городской власти для нужд реализации составных и инвестиционно-емких проектов смешанного назначения предоставлен мощный инструментарий формализованного моделирования и выбора вариантов организации цикла МСП совместно с практическими рекомендациями по организационно-управленческой реализации в виде временных административных групп (дирекций).

Ключевые слова: муниципальный строительный проект (МСП); инструментарий организационно-технологического девелопмента МСП; временная оргструктура администрирования МС; девелопмент; операционная деятельность

P. P. TESLENKO^{1*}, O. A. BONDAR²,
V. O. POKOLENKO³, I. M. YAKYMCHUK⁴, O. M. KHOMENKO⁵

^{1*} Department of Management in Construction of The Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky Avenue, 31, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38 (044) 241 54 98, e-mail nkc_kiev@ukr.net

² Department of Management in Construction of The Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky Avenue, 31, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38 (044) 241 54 98, e-mail alenka_bon@i.ua, ORCID 0000-0002-4633-6859

³ Department of Management in Construction of The Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky Avenue, 31, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38 (044) 241 54 98, e-mail nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0003-1750-5964

⁴ Department of Management in Construction of The Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky Avenue, 31, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38 (044) 241 54 98, e-mail nkc_kiev@ukr.net

⁵ Department of Management in Construction of The Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky Avenue, 31, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38 (044) 241 54 98, e-mail nkc_kiev@ukr.net, ORCID 0000-0002-6242-4736

INNOVATIVE TOOLS OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF MUNICIPAL BUILDING PROJECTS

Purpose. Development of tools that provides organizational and technological, and organizational and structural substantiation of the cycle of municipal building projects (MBP) as specific construction and investment projects that are being prepared and implemented by the municipal authorities to solve urgent infrastructure, municipal, environmental and social problems of vital activity of the cities of Ukraine. **Methodology.** Applied tools of organizational and technological development of municipal building projects as an organizational, structural, administrative, and operational and technological means of their preparation and implementation, adapted to the content of life cycle characteristics and administrative features of these projects in the format of a special developer organizational structure, which is based and will act as a temporary functional administrative group. **Findings.** Based on the research, it was found out that when implementing municipal large-scale social construction projects, the problem of development is deepened by the need on the part of the municipal authorities to search for a development company.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

The specificity of MBP as construction projects (considerable duration, technical and technological complexity, mixed functional purpose, significant investment capacity, etc.) gave grounds to substantiate the organizational, managerial and functional-technological basis of the system of construction development for these projects. **Originality.** For the first time, the building development system has been updated for mixed-use projects based on a combination of multi-criteria resource scheduling approaches with methodological platforms that are used in building organization, development and modern practice of enterprise management. **Practical value.** The executive bodies of the city government for the implementation of composite and investment-intensive projects of mixed use are provided with powerful tools of formalized modeling and selection of options for organizing the cycle of MBP, along with practical recommendations on organizational and management implementation in the form of temporary administrative groups (directors).

Keywords: municipal building project (MBP), organizational and technological development tool at MBP, interim organizational structure of administration of MBP; development; operating activities

REFERENCES

- Kensek, K., & Noble, D. (2014). *Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley. (in English)
- Mykytas, M., Terenchuk, S., & Zhuravska, N. (2018). Models, Methods and Tools of Optimizing Costs of Development of Clusterized Organizational Structures in Constructing Industry. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 250-254. (in English)
- Bondar, O. A., & Kochedykova, A. Ye. (2015). Udoskonalennia orhanizatsiino-ekonomichnoi modeli innovatsiinoi diialnosti pidpriemstva. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, 25(1), 75-77. (in Ukrainian)
- Kistion, V. Ye. (2017). Innovatsiini modeli restrukturyzatsiinykh protsesiv infrastrukturykh pidpriemstv. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 12, 19-28. (in Ukrainian)
- Korostelev, S. P. (2009). *Teoriya i praktika ochenki dlja celej developmenta i upravlenija nedvizhimost'ju*. Moskva: Marosejka. (in Russian)
- Kotljarov, M. A. (2018). *Osnovy developmenta nedvizhimosti*. Moskva: Jurajt. (in Russian)
- Mazur, I. I., Shapiro, V. D., & Ol'derogge, N. G. (2004). *Development*. Moskva: Jekonomika. (in Russian)
- Pejzer, R. B., & Frej, A. B. (2003). *Professional'nyj development nedvizhimosti*. Vashington: Institut gorodskih zemel'. (in Russian)
- Pokolenko, V. O., & Teslenko, P. P. (2017). Zastosuvannia imperatyviv TAQM dlia modernizatsii topolohii budivelnnykh developerskykh kontraktiv. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 36(2), 171-178. (in Ukrainian)
- Teslenko, P. P. (2017). Orhanizatsiino-tekhnologichniy instrumentarii munitsypalnykh proektiv v budivnytstvi. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, 29(2), 134-142. (in Ukrainian)
- Teslenko, P. P. (2018). Normatyvno-pravovi mekhanizmy udoskonalennia budivelnoho developmentu. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, 30 (2), 149-154. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 03.06.2019

Прийнята до друку 11.06.2019

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

UDC 621.131.543:517.9

V. D. PETRENKO¹, O. L. TIUTKIN^{2*}, D. YU. IHNATENKO³

¹ Department «Bridges and Tunnels» of Dnipro 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

^{2*} Department «Bridges and Tunnels» of Dnipro 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

³ Department «Bridges and Tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 442 36 63, e-mail undulula@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

ANALYSIS OF THE DIFFERENCES OF THE RESULTS OF CALCULATIONS OF THE STABILITY COEFFICIENT OF THE LANDSLIDE SLOPE

Purpose. Improving the accuracy of determining the stability of landslide slopes in some cases requires the use of several methods to find the coefficient of stability. Therefore, it is necessary to analyze the discrepancy between the results of the calculation of the coefficient of stability of landslide slopes. **Methodology.** The solution to the problem of finite element slope modeling in the LIRA-SAPR 2016 software package is based on the creation of a spatial finite element model. With its help, the nonlinear problem of geomechanics was solved with the introduction of special finite elements, which simulates the work of the soil. As a reference, the coefficient of stability was calculated by the round-cylindrical sliding surface method. Landslide slope in the software package «OTKOS» was created and calculated. **Results.** The results of the calculation of the finite element model of the landslide slope in the LIRA-SAPR 2016 software package were obtained. The value of the coefficient of stability of the landslide-hazardous section of the slope in the «OTKOS» was obtained using eight methods. The calculation results in the «OTKOS» are compared with the coefficient of stability determined by the method of a circular-cylindrical sliding surface. **Originality.** The results of the calculation of the coefficients of stability in the «OTKOS» allowed us to divide the curves of the sliding surface into two groups: that which do not belong to circular-cylindrical, and that which satisfy the results of finite element modeling. **Practical value.** After a series of calculations and after analyzing the results, it turned out that not all methods equally solve the problem of the stability of landslide slopes. This is due to the different limitations of each of the methods, so as a criterion for the adequacy of the results obtained, it is necessary to analyze the magnitude of the discrepancy between the obtained values of the coefficient of stability.

Key words: landslide; landslide slope; finite element method; sliding surface; coefficient of stability

Introduction

When designing any kind of protection against landslides of slopes, during construction on unstable slopes or when placing mechanisms on the slopes, or the sides of the ravine, work should begin with an assessment of the state of stability of the inclined surface of the earth. Such an estimate has been making by calculating the stability coefficient, which is characterized by the ratio of holding forces to the forces that shift the body of the slope. To design the landslide protection, it is often necessary to determine the amount of soil pressure (shear pressure) from the displacement of the body to the protective structure. For such calculations there is a very large number of calculation methods, which, in essence, are not regulated by norma-

tive documents.

Purpose

To calculate the slope stability and to find the sliding surface, it is advisable to apply several methods of calculation, since when using different methods, the results are always slightly different, and increasing the accuracy of the calculation in some cases requires the using of several methods at once.

Methodology

Most of the existing methods for calculating the stability of the slopes have been developed to calculate the slope stability coefficient. Then these calculations are transformed to determine the shear pressure, that is the pressure, transmitted from the

unstable earth masses of the slope. At the same time, for calculating the protection retaining structures, methods of constructing a shearing diagram of the displacement are developed.

All calculating methods for assessing the state of stability of slopes are based on the application of the theory of boundary equilibrium, which considers the boundary stress state of the soil massif. In the calculation model, a number of conditional assumptions are adopted:

1) the hypothesis of a solid body is used (the prism of a possible displacement is considered as a hardened wedge);

2) the narrow slope of the slope is considered 1 m wide, the conditions of its work are kept for the whole slope;

3) a certain form of surface of a slip is allowed;

4) when using the main strength criterion ($\tau = \sigma tg\varphi + C$), the stresses are replaced by forces;

5) in some methods, the force of interaction between the compartments on which the shrink block is split is not taken into account;

6) the following assumptions regarding the values and manifestations of ground water pressure and seismic force are adopted;

7) in some methods, when considering equilibrium of the slope, on equation of statics is taken;

8) In some cases, the theory of boundary equilibrium is applied to a soil slope located in an out-of-bound state (with $C_{is} < 1$).

In calculations of shear pressure, the position of the most dangerous surface of a landslide, as a rule, is taken already found.

It is often, when the surface of the slide is determined by the geological structure itself, for example, when the cover soils slide over the indigenous rocks. However, in such cases, caution should be applied to the analysis. If the indigenous soils are semi-skeletal soils (argillites, aleurolytics, limestones, etc.), then the surface of sliding can pass both above and below the surface of such rocks. In the final form, to simplify the calculations, the sliding surface should be taken in the form of the simplest forms – from broken lines, from the arcs of the circle, etc. (Ignatenko, Tiutkin, Petrenko, & Alkhdour, 2019; Гинзбург, 2007).

The position of the sliding surface, as well as the value of the characteristics of soil strength (C and φ) (Строкова, 2008), established on the basis of engineering geological surveys, should be veri-

fied by inverse calculations based on the value of the coefficient of stability of the slope, approximately corresponding to its value at the actual state of the slope (in the unstable position of the slope $C_{is} \approx 1$). At the same time, according to the results of studies of many scientists (Гольдштейн, 1971; Дорфман, & Туровская, 1975; Мальшев, 1980; Маслов, 1977; Терцаги, 1961), the value of landslide characteristics of soils at the surface of the sliding surface can be reduced due to the possible change in their time in the light of creep. Such a decrease in the strength of soil properties (especially clay) in some conditions may be significant, which must be taken into account during design.

Results

The software complex «LIRA CAD 2016» allows us to calculate the nonlinear problem of geomechanics using special FEs that simulate the work of the soil (Albataineh, 2006; Griffiths, & Lane, 1999; Petrenko, Tiutkin, Ihnatenko, & Kovalchuk, 2018).

Soil layers have been modeled by bulky elements of the type FE 271-276 with the corresponding physical and mechanical characteristics, obtained as a result of engineering geological surveys, depicted in different colors in fig. 1.

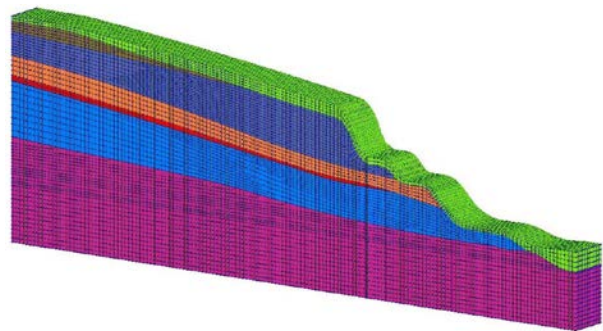


Fig. 1. Finite element model of landslide slope

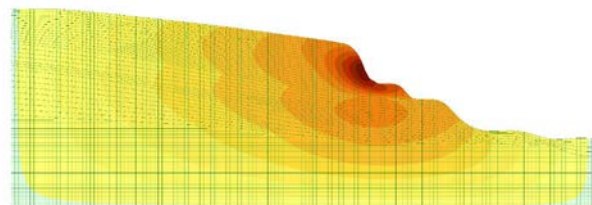


Fig. 2. The results of calculating the shear stage are horizontal displacement of the slope

For practical calculations, we can use the method of a circular cylindrical surface of the slide (fig. 3). Let's consider the prism of sliding. The center

of rotation O and the value of radius R are given based on the results of calculating the finite-element slope model.

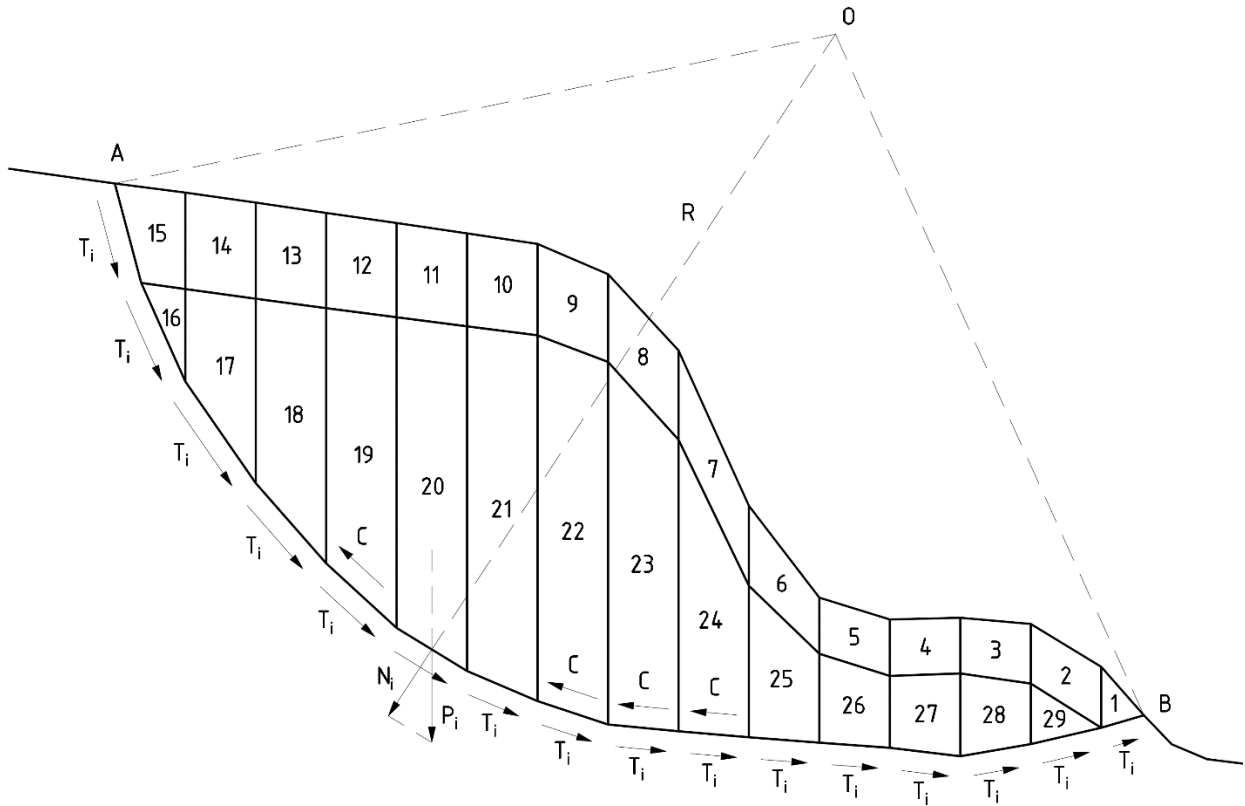


Fig. 3. Scheme for calculating the coefficient of stability of the slope by the method of a circular-cylindrical surface

We split the prism of sliding through vertical sections into a number of compartments and we take the weight of each compartment P_i conditionally applied to the point of intersection of the line of action with the corresponding slice arc segment. Weigh strength forces in the direction of the radius of rotation (N_i) and it is perpendicular (T_i). Then we formulate the equilibrium equation in the form of the sum of moments of all forces relative to the center of rotation:

$$\sum M(O) = \sum T_i \cdot R - \sum P_i \cdot \text{tg}\varphi \cdot R - C \cdot L \cdot R, \quad (1)$$

where L – length of arc sliding AB; φ – angle of internal friction of the soil; C – specific gravity of the soil.

Friction force:

$$T_i = P_i \cdot \sin\varphi. \quad (2)$$

Hold-up weight of soil:

$$N_i = P_i \cdot \text{tg}\varphi. \quad (3)$$

In this equation, the first term is a shear moment, and the other two are the values of the restraining moment of the opposite direction:

$$M_i = \sum T_i \cdot R. \quad (4)$$

$$M_i = \sum P_i \cdot \text{tg}\varphi \cdot R + C \cdot L \cdot R. \quad (5)$$

Their ratio is the coefficient of stability of the slope:

$$C_{ts} = \frac{\sum T_i}{\sum N_i}, \quad (6)$$

where $\sum T_i$ – holding forces; $\sum N_i$ – shifting forces.

In this expression the value of the radius of rotation R had gone.

Soil friction coefficient:

$$f = \text{tg}\varphi. \quad (7)$$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Table 1

Com-partment number	Design layer of soil	Angle of internal friction φ , deg.	Area of the compartment, m^2	Specific gravity of soil, t/m^3	Weight of the compartment, t
1	1	25	1.05	1.87	1.96
2		26	3.42		6.40
3			3.27		6.11
4			3.18		5.95
5			3.19		5.97
6			3.86		7.22
7			4.8		8.98
8			5.02		9.39
9			5.08		9.50
10			5.23		9.78
11			5.31		9.93
12			5.37		10.04
13			5.42		10.14
14			5.46		10.21
15			25		4.43
16	3	26	1.64	1.84	3.02
17			7.85		14.44
18			12.46		22.93
19			16.04		29.51
20			18.58		34.19
21			20.14		37.06
22			20.65		38.00
23			18.54		34.11
24			12.56		23.11
25			6.81		12.53
26			4.56		8.39
27			4.39		8.08
28			4.07		7.49
29			1.72		3.16

Table 2

Combined compartments	Weight of combined compartments P, t	T, t	N, t
1	1.96	0.83	0.92
2+29	35.91	15.74	17.51
3+28	13.60	5.96	6.63
4+27	14.02	6.15	6.84
5+26	14.36	6.29	7.00
6+25	19.75	8.66	9.63
7+24	32.09	14.07	15.65
8+23	43.50	19.07	21.22
9+22	47.50	20.82	23.17
10+21	46.84	20.53	22.84
11+20	44.12	19.34	21.52
12+19	39.56	17.34	19.29
13+18	33.06	14.49	16.13
14+17	24.65	10.81	12.02
15+16	11.30	4.95	5.27

Coefficient of stability of the slope:

$$C_{ls} = \frac{205.64 + 0.18 \cdot 37.3}{185.06} = 1.147.$$

Thus, this slope is stable, but at the same time it has a rather small stock (about 15 %) of stability, so it needs to be strengthened.

The calculation of the stability of the landslide slope in the software complex «ОТКОС» (Перельмутер, 2002; Петренко, Тютюкін, Дубінчик, & Кільдєєв, 2015; Федоровский, 1997) allows us to determine the coefficient of stability of slopes. As a mechanism of stability loss, a sliding mechanism of a sliding slope relative to a stationary slope is taken. The resistance to slide surface displacement is calculated as for static conditions. Along the entire surface, the criterion for soil destruction, adopted in the form of the Coulomb law, is maintained.

The real stresses of the shift obtained by calculation is compared with the marginal displacement

resistance, and the result of this comparison is expressed as a coefficient of stability of the C_{ls} . The coefficient of stability of the slope (slope) is the minimum of the coefficients of stability of the stability on all possible slip surfaces satisfying the given restriction, laid down in the calculation method (fig. 4-11).

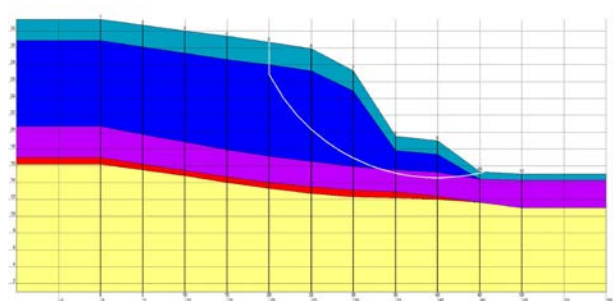


Fig. 4. Results of calculating the stability of the slope by the Bishop's method (simplified), $C_{ls} = 1,363$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

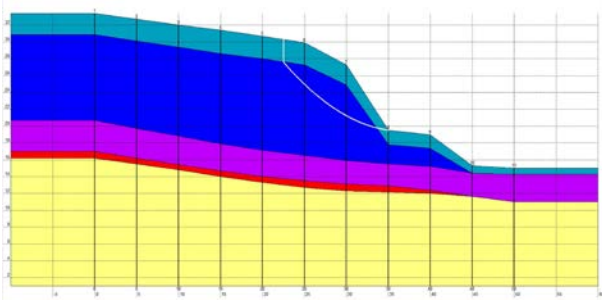


Fig. 5. Results of calculating the stability of the slope by the Corps of Engineers method #1, $C_{ls} = 1,396$

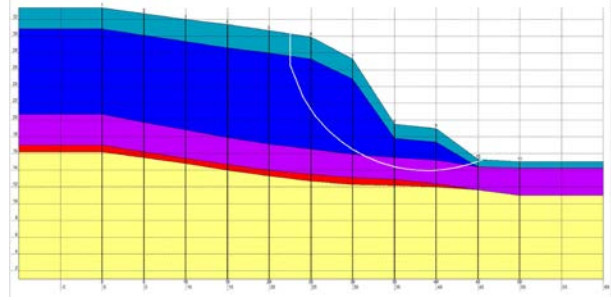


Fig. 9. Results of calculating the slope stability using the Fellenius' method, $C_{ls} = 1,174$

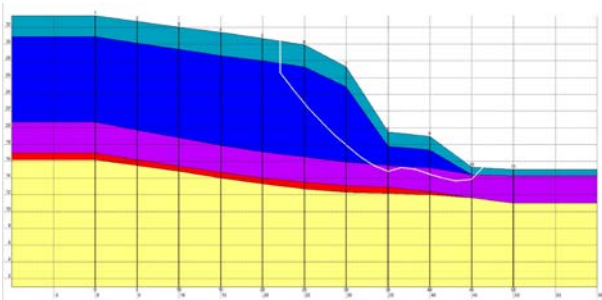


Fig. 6. The results of calculating the stability of the slope by the method Lowe-Karafiath, $C_{ls} = 1,147$

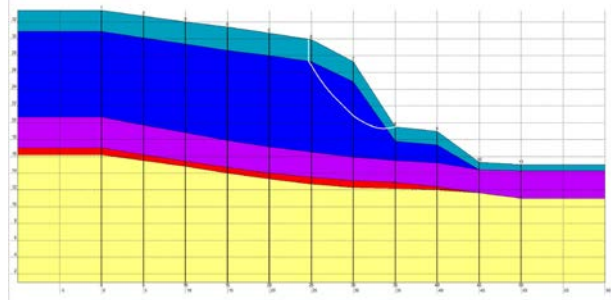


Fig. 10. Results of calculating the stability of the slope using the Yanbu's method (corrected), $C_{ls} = 1,22$

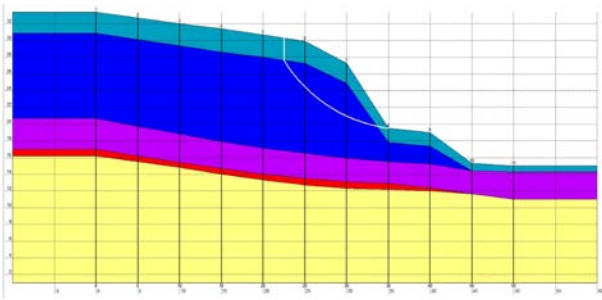


Fig. 7. Results of calculating the slope stability using the Spencer's method, $C_{ls} = 1,348$

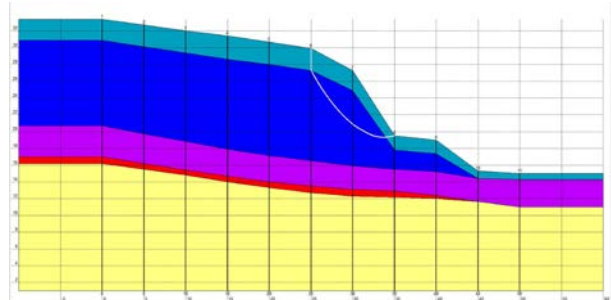


Fig. 11. Results of calculating the stability of the slope using the Yanbu's method (simplified), $C_{ls} = 1,144$

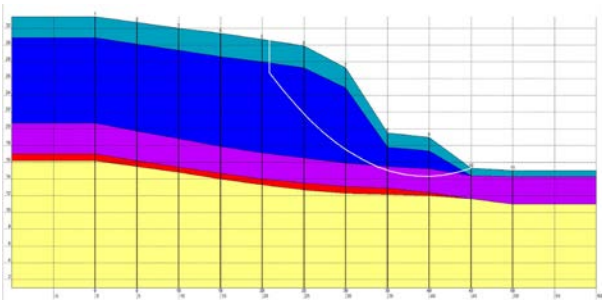


Fig. 8. Results of calculating the stability of the slope by the method of Fedorovsky-Kurilo, $C_{ls} = 1,272$

Output includes:

- the dimensions of the sloping slope area;
- the depth of burrowing (if there is an active marker for licking);
- characteristics of soils;
- states and characteristics of wells;
- load acting on specified slopes.

The calculation results can be summarized in the table.

In this case, we can conclude that the worst scenario of the development of the shift occurs in

the case when the stability coefficient is minimal, that is, according to the Yanbu method (fig. 11).

Table 3

The name of the method	The obtained coefficient of stability C_{ls}
Bishop's method	1.363
Corps of Engineers method #1	1.396
Lowe's-Karafiath's method	1.147
Spencer's method	1.348
Method of Fedorovsky-Kurilo	1.272
Fellenius' method	1.174
Yanbu's method (corrected)	1.220
Yanbu's method (simplified)	1.144

After analyzing the nature of the curves of the sliding surfaces, we can conclude that the relatively small value of the coefficient of stability is due to a rather steep incident curve sliding surface.

Originality and practical value

Having carried out a number of calculations and analyzed the results obtained, we can conclude that not all methods are equally solvable for the same stability problem. First of all, this is due to the fact that different methods of calculation have different constraints and the basis on which the method is based. Therefore, as a criterion for the adequacy of the results obtained, it is necessary to take into account the magnitude of the discrepancy between the obtained values of the stability coefficients and to compare the calculated values of the surface of the slip with the result of the calculation of the finite element model.

Conclusions

It should be noted that the methods Fellenius, Bishop (simplified) and Spencer allow to find only circular cylindrical surfaces of sliding.

Table 4

Stability factor obtained by the method of a circular-cylindrical surface of a slide	The name of the method	Stability factors obtained in the software complex «OTKOS»	Deviation
1.147	Corps of Engineers method #1	1.396	21.71 %
	Bishop's method	1.363	18.83 %
	Spencer's method	1.348	17.52 %
	Method of Fedorovsky-Kurilo	1.272	10.90 %
	Yanbu method (corrected)	1.220	6.36 %
	Fellenius' method	1.174	2.35 %
	Lowe's-Karafiath's method	1.147	0.00 %
	Yanbu's method (simplified)	1.144	-0.26 %

At the same time, as a result of finite-element simulation, a similar surface displacement slip was obtained, which confirms the correctness and reliability of the obtained coefficients of stability for these methods.

As a result of calculations made by the method of finite element modeling, the curve of the sliding surface can be considered circularly-cylindrical, that is, one that has an imaginary center of rotation of the displacement body. Accordingly, the coefficients of stability and the sliding surface curves

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

obtained in the software complex "OTKOS" can be divided into two groups – those that do not belong to circular-cylindrical ones, and those that satisfy the results of the finite element modeling. That is, according to Table 4, the Fellenius' method can be considered to be the most consistent with the circular-cylindrical surface method, with a rejection of only 2.35 %, while other methods of Bishop and Spencer have a significant discrepancy compared to the Fellenius' method. As already mentioned earlier, other methods in the software complex "OTKOS" determine the sliding surface as not round-cylindrical, but nevertheless they deserve attention. The lowest coefficient of stability was obtained using the simplified Yanbu's method, but the variation is only 0.26 % in the direction of decrease.

REFERENCES

- Albataineh, N. (2006). *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*. The university of Akron, Ohio, United States.
- Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49(3), 387-403.
- Ignatenko D., Tiutkin, O. L., Petrenko, V. D., & Alkhdour, A. M. (2019). Application of centrifugal modeling for the study of landscape structure stability. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 10(01), 2179-2187.
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Ihnatenko, D. Yu., & Kovalchuk, V. V. (2018). Comparative calculation of the stability of the landslide slope in the software complexes «OTKOS» and «LIRA-CAD 2017». *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 14, 101-109.
- Гинзбург, Л. К. (2007). *Противопопозневые сооружения*. Днепропетровск: Лира ЛТД.
- Гольдштейн, М. Н. (1971). *Механические свойства грунтов. Основные компоненты грунта и их взаимодействие*. Москва: Стройиздат.
- Дорфман, А. Г., & Туровская, А. Я. (1975). Исследование устойчивости склонов. *Вопросы геотехники*, 24, 132-156.
- Малышев, М. В. (1980). *Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений*. Москва: Стройиздат.
- Маслов, Н. Н. (1977). *Механика грунтов в практике строительства*. Москва: Стройиздат.
- Перельмутер, А. В. (2002). *Расчетные модели сооружений и возможности их анализа*. Киев: Сталь.
- Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., Дубінчик, О. І., & Кільдєєв, В. Р. (2015). Оцінка стійкості природних схилів методами математичного моделювання в програмі «ОТКОС». *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 8, 23-32.
- Строкова, Л. А. (2008). Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов. *Известия Томского политехнического университета*, 1, 69-74.
- Терцаги, К. (1961). *Теория механики грунтов*. Москва: Стройиздат.
- Федоровский, В. Г. (1997). Метод расчета устойчивости откосов и склонов. *Геоэкология*, 6, 95-106.

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, О. Л. ТЮТЬКІН^{2*}, Д. Ю. ІГНАТЕНКО³

^{1*} Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський 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

² Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський 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

³ Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 442 36 63, ел. пошта undulula@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

АНАЛІЗ РОЗБІЖНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ КОЕФІЦІЄНТА СТІЙКОСТІ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНОГО СХИЛУ

Мета. Підвищення точності визначення стійкості зсувонебезпечного схилу в ряді випадків вимагає використання відразу декількох методів відшукування коефіцієнта стійкості. Тому слід проаналізувати розбіжності результатів розрахунків коефіцієнта стійкості зсувонебезпечного схилу. **Методика.** Вирішення задачі скінченно-елементного моделювання схилу в програмному комплексі «ЛІРА-САПР 2016» базується на

створенні просторової скінченно-елементної моделі. З її допомогою вирішено нелінійну задачу геомеханіки з використанням спеціальних скінченних елементів, що моделюють роботу ґрунту. В якості еталонного виконано розрахунок коефіцієнту стійкості методом круглоциліндричної поверхні ковзання. Створено та розраховано зсувонебезпечний схил в програмному комплексі «ОТКОС». **Результати.** Отримано результати розрахунку скінченно-елементної моделі зсувонебезпечного схилу в програмному комплексі «ЛІРА-САПР 2016». Отримано значення коефіцієнту стійкості зсувонебезпечної ділянки схилу в програмному комплексі «ОТКОС» за допомогою восьми методів. Результати розрахунку в програмному комплексі «ОТКОС» порівняно із коефіцієнтом стійкості, визначеним методом круглоциліндричної поверхні ковзання. **Наукова новизна.** Результати розрахунку коефіцієнтів стійкості в програмному комплексі «ОТКОС» дозволили поділити криві поверхні ковзання на дві групи – ті, що не відносяться до круглоциліндричних, та ті, що задовольняють результатам скінченно-елементного моделювання. **Практична значимість.** Провівши ряд розрахунків та проаналізувавши отримані результати, з'ясовано, що не всі методи однаково вирішують задачу стійкості зсувонебезпечного схилу. Це пов'язано з різними обмеженнями кожного з методів, тому в якості критерію адекватності отриманих результатів необхідно аналізувати величину розбіжності між отриманими значеннями коефіцієнтів стійкості.

Ключові слова: зсувонебезпечний схил; зсув; метод скінченних елементів; поверхня ковзання; коефіцієнт стійкості

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, А. Л. ТЮТЬКИН^{2*}, Д. Ю. ИГНАТЕНКО³

^{1*} Кафедра «Мосты и тоннели», Днепровский 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

² Кафедра «Мосты и тоннели», Днепровский 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

³ Кафедра «Мосты и тоннели», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина 49010, тел. +38 (097) 442 36 63, эл. почта undulula@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

АНАЛИЗ РАСХОЖДЕНИЙ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ КОЭФФИЦИЕНТА УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕОПАСНОГО СКЛОНА

Цель. Повышение точности определения устойчивости оползнеопасных склонов в ряде случаев требует использования сразу нескольких методов отыскания коэффициента устойчивости. Поэтому следует проанализировать расхождения результатов расчетов коэффициента устойчивости оползнеопасных склонов. **Методика.** Решение задачи конечно-элементного моделирования склона в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2016» базируется на создании пространственной конечно-элементной модели. С ее помощью решена нелинейная задача геомеханики с использованием специальных конечных элементов, моделирующих работу ґрунта. В качестве эталонного выполнен расчет коэффициента устойчивости методом круглоцилиндрической поверхности скольжения. Создан и рассчитан оползнеопасный склон в программном комплексе «ОТКОС». **Результаты.** Получены результаты расчета конечно-элементной модели оползнеопасного склона в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2016». Получено значение коэффициента устойчивости оползнеопасного участка склона в программном комплексе «ОТКОС» с помощью восьми методов. Результаты расчета в программном комплексе «ОТКОС» сравнены с коэффициентом устойчивости, определенным методом круглоцилиндрической поверхности скольжения. **Научная новизна.** Результаты расчета коэффициентов устойчивости в программном комплексе «ОТКОС» позволили разделить кривые поверхности скольжения на две группы – те, которые не относятся к круглоцилиндрической, и те, что удовлетворяют результатам конечно-элементного моделирования. **Практическая значимость.** Проведя ряд расчетов и проанализировав полученные результаты, выяснилось, что не все методы одинаково решают задачу устойчивости оползнеопасных склонов. Это связано с различными ограничениями каждого из методов, поэтому в качестве критерия адекватности полученных результатов необходимо анализировать величину расхождения между полученными значениями коэффициентов устойчивости.

Ключевые слова: оползнеопасный склон; оползень; метод конечных элементов; поверхность скольжения; коэффициент устойчивости

© V. D. Petrenko, O. L. Tiutkin, D. Yu. Ihnatenko, 2019

REFERENCES

- Albatineh, N. (2006). *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*. The university of Akron, Ohio, United States. (in English)
- Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49(3), 387-403. (in English)
- Ignatenko D., Tiutkin, O. L., Petrenko, V. D., & Alkhdour, A. M. (2019). Application of centrifugal modeling for the study of landslide structure stability. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 10(01), 2179-2187. (in English)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Ihnatenko, D. Yu., & Kovalchuk, V. V. (2018). Comparative calculation of the stability of the landslide slope in the software complexes «OTKOS» and «LIRA-CAD 2017». *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 14, 101-109. (in English)
- Ginzburg, L. K. (2007). *Protivoopolznevye sooruzhenija*. Dnepropetrovsk: Lira LTD. (in Russian)
- Gol'dshtejn, M. N. (1971). *Mehanicheskie svojstva gruntov. Osnovnye komponenty grunta i ih vzaimodejstvie*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Dorfman, A. G., & Turovskaja, A. Ja. (1975). Issledovanie ustojchivosti sklonov. *Voprosy geotekhniki*, 24, 132-156. (in Russian)
- Малышев, М. В. (1980). *Prochnost' gruntov i ustojchivost' osnovanij sooruzhenij*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Maslov, N. N. (1977). *Mehanika gruntov v praktike stroitel'stva*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Perel'muter, A. V. (2002). *Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnosti ih analiza*. Kiev: Stal'. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Dubinchyk, O. I., & Kildieiev, V. R. (2015). Otsinka stiikosti pryrodnykh skhyliv metodamy matematychnoho modeliuвання v prohrami «OTKOS». *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 8, 23-32. (in Ukrainian)
- Strokova, L. A. (2008). Opredelenie parametrov dlja chislenного modelirovanija povedenija gruntov. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 1, 69-74. (in Russian)
- Tercagi, K. (1961). *Teorija mehaniki gruntov*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Fedorovskij, V. G. (1997). Metod rascheta ustojchivosti otkosov i sklonov. *Geojekologija*, 6, 95-106. (in Russian)

Надійшла до редколегії 06.05.2019.

Прийнята до друку 20.05.2019.

◆ ◆ ◆ ◆ ◆
Наукове видання
МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Збірник наукових праць
Дніпровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Випуск 15
(українською, англійською та російською мовами)

Відповідальні за випуск – О. Л. Тютюкін, Н. К. Петросян
Комп'ютерне верстання – В. Л. Рикіна
Статті в збірнику публікуються в авторській редакції

Формат 60×84 1/8. Ум. др. арк. 7,67. Тираж 50 пр. Зам. № 2019/8.

Видавництво ПП «Крос-Принт», 49047, м. Дніпро, пров. Верстатобудівельний, 3/4
Свідоцтво ДК №2804 від 26.03.2007 р.
Віддруковано: ФОП Удовиченко О. М., 49080, м. Дніпро, вул. Донецьке шосе, 15/531
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру ДК №3660 від 28.12.2009 р.

◆ ◆ ◆ ◆ ◆
Scientific edition
BRIDGES AND TUNNELS: THEORY, RESEARCH, PRACTICE

Collection of scientific works
of Dnipro National University
of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan
Issue 15
(in Ukrainian, English and Russian languages)

Responsible for issue – Oleksii Tiutkin, Nataliia Petrosian
Desktop publishing – Vera Rykina
Articles in the collection are printed in the author's wording

Format 60×84 1/8. Conventional printed sheet 7,67. Circulation 50. Order no. 2019/8.

Publishing house «Kros-Prynt», 49047, Dnipro, Verstatobudivel'nyj Lane, 3/4
Certificate ДК no. 2804 of 26.03.2007.
Printed: SP Udovychenko O. M., 49080, Dnipro, Donec'jke shose Str., 15/531
Certificate of making a publishing business subject
to the State Register of Civil Code ДК no. 3660 of 28.12.2009.

◆ ◆ ◆ ◆ ◆
Научное издание
МОСТЫ И ТОННЕЛИ: ТЕОРИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРАКТИКА

Сборник научных трудов
Днепровского национального университета
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна
Выпуск 15
(на украинском, английском и русском языках)

Ответственные за выпуск – А. Л. Тютюкин, Н. К. Петросян
Компьютерная верстка – В. Л. Рыкина
Статьи в сборнике публикуются в авторской редакции

Формат 60×84 1/8. Усл. печ. лист 7,67. Тираж 50 экз. Заказ № 2019/8.

Издательство ПП «Крос-Принт», 49047, г. Днепр, пер. Станкостроительный, 3/4
Свидетельство ДК №2804 от 26.03.2007 г.
Отпечатано: ФЛП Удовиченко А. Н., 49080, г. Днепр, ул. Донецкое шоссе, 15/531
Свидетельство о внесении субъекта издательского дела
в Государственный реестр ДК №3660 от 28.12.2009 г.



ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print). Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : Зб. наук. праць Дніпров. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2019. Випуск 15.