

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Збірник наукових праць

Дніпровського національного університету
залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Випуск 18

2020

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. ПІШНЬКА

Засновано у 2011 році

Випуск 18



**Дніпро
2020**

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 02.11.2020 р., протокол № 3

*Включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»)
наказом Міністерства освіти і науки України від 28.12.2019 р. № 1643
(технічні спеціальності – 192)*

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

Редакційна колегія:

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

Члени редакційної колегії:

доктори технічних наук *Абдельрахман Абуальдас*,
Д. О. Банніков, *Ю. Л. Війников*, *Г. І. Гайко*, *С. М. Гапеев*,
В. В. Ковальчук, *Й. Й. Лучко*, *М. І. Нетеса*, *В. Д. Петренко*,
А. А. Плугін, *А. В. Радкевич*, *М. П. Сисин*, *Р. О. Тімченко*,
Станіслав Фіц, *В. Г. Шаповал*, доктор філософії *Ахмад Алхдур*

Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : Збірник наукових праць Дніпровського на-
Д 54 **ціонального університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 18. –**
Дніпро, 2020. – 126 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, проєктування, 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.

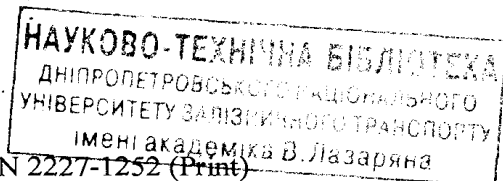
Збірник наукових праць становить інтерес для працівників експлуатаційних і науково-дослідних організацій, викладачів закладів вищої освіти, докторантів, аспірантів, магістрантів та інженерно-технічних працівників.

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 заведений высшего образования учебных, 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, 2020

867802 - 867803 - (2)

Г.К.

ЗМІСТ

І. А. АРУТЮНЯН, А. А. ШУВАЄВ

ЕКОЛОГІЧНО-ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ ВІДХОДІВ В БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ.....	9
---	---

Л. О. ВАСИЛЬЧУК, А. М. ЯШНОВ

ДІАГНОСТИКА ПІДМИВУ ОПОР МОСТІВ ЗГІДНО ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	18
---	----

Ю. Л. ВИННИКОВ, С. М. МАНЖАЛІЙ

УДОСКОНАЛЕННЯ ГЕОТЕХНІЧНОГО МОНИТОРИНГУ ПІДСИЛЕННЯ ДЕФОРМОВАНОЇ БУДІВЛІ НА ПАЛЬОВОМУ ФУНДАМЕНТІ	28
---	----

Г. Е. ГУСЛИСТА, Д. С. ЯРОШЕНКО

ДИНАМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ЛОКАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО ПОШКОДЖЕННЯ БУДІВЕЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ	40
--	----

Н. О. ДАНКЕВИЧ

ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТУ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА ДИНАМІЧНОСТІ З ДОТРИМАННЯМ ПРИНЦИПІВ САМОРЕГУЛЯЦІЇ	50
---	----

С. М. ДЕМЧЕНКО, А. М. КУРГАН, Г. О. ЛИННИК

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УКЛАДАННЯ БЕЗБАЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА НА ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТАХ	58
--	----

К. О. ЖУНЄВ

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВТОМНОГО РЕСУРСУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ	67
---	----

В. В. КУЛЯБКО

ПРО МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З НЕСУЧИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ І НАВКОЛИШНІМИ СЕРЕДОВИЩАМИ (ОГЛЯД).....	76
---	----

Й. Й. ЛУЧКО

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ ПІД ЧАС РУХУ ҐРУНТУ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ТРУБІ ПРИ БЕЗТРАНШЕЙНІЙ ПРОКЛАДЦІ	84
--	----

І. В. МЯСНИКОВ

АРМУВАННЯ БЕТОНУ СПЕЦІАЛЬНИМ ВОЛОКНИСТИМ МАТЕРІАЛОМ ПРИ ТОРКРЕТУВАННІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК.....	91
--	----

В. Д. ПЕТРЕНКО, В. В. ХАРЧЕНКО, Р. М. ТЕРЕЩУК, О. М. ПЕТРОВ

ЗАЛЕЖНОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФУНДАМЕНТІВ ТА ОСНОВ ПРИ ЇХ ВІДНОВЛЕННІ НА ОСНОВІ БУРОІН'ЄКЦІЙНИХ СВЕРДЛОВИН.....	96
--	----

О. Л. ТЮТЬКІН, І. С. ОСТАПЕНКО

ПІДСИЛЕННЯ ФУНДАМЕНТІВ АВТОМОБІЛЬНИХ МОСТІВ

В КОНТЕКСТІ ПРОБЛЕМНОГО СТАНУ

ТРАНСПОРТНО-ДОРОЖНЬОГО КОМПЛЕКСУ..... 106

А. І. ЮХИМЕНКО, Р. В. САМЧЕНКО

ЗАСАДИ МЕТОДУ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ..... 113

Д. М. СМЕРДОВ, М. О. ЯЩУК

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТИ ПОПЕРЕДНЬОГО НАПРУЖЕННЯ

ПРИ ПІДСИЛЕННІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК КОМПОЗИЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ..... 119

TABLE OF CONTENTS

I. A. ARUTIUNIAN, A. A. SHUVAEV ENVIRONMENTALLY-ECONOMIC FEASIBILITY OF INTEGRATED MANAGEMENT OF WASTE FLOWS IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY	9
L. A. VASILCHUK, A. N. YASHNOV DIAGNOSTICS OF BRIDGE SCOUR BY DYNAMIC PARAMETERS	18
YU. L. VYNNYKOV, S. M. MANZHALII IMPROVEMENT OF GEOTECHNICAL MONITORING OF STRENGTHENING OF DEFORMED BUILDINGS ON PILE FOUNDATION	28
A. E. GUSLYSTA, D. S. YAROSHENKO DYNAMIC EFFECTS BY THE STRUCTURAL DAMAGE OF THE BUILDING STRUCTURE	40
N. A. DANKEVYCH FORMATION OF A SYSTEM FOR SELECTING THE OPTIMAL OPTION OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS UNDER UNCERTAINTY AND DYNAMIC CONDITIONS WITH OBSERVANCE OF THE PRINCIPLE OF SELF-REGULATION	50
S. M. DEMCHENKO, A. M. KURGAN, G. O. LYNNYIK IMPROVEMENT OF LAYING TECHNOLOGY OF BALLASTLESS BRIDGE DECK ON RAILWAY BRIDGES	58
K. O. ZHUNEV FATIGUE LIFE ASSESSMENT METHOD OF WELDED JOINTS IN RAILWAY GIRDERS	67
V. V. KULJABKO ABOUT MODELS OF INTERACTION OF HIGH-SPEED VEHICLE WITH BEARING STRUCTURES AND ENVIRONMENTS (REVIEW)	76
J. J. LUCHKO EXPERIMENTAL-THEORETICAL METHOD OF DETERMINING THE FRICTION COEFFICIENT DURING THE MOTION OF THE SOIL IN A CYLINDRICAL PIPE WITH A HORIZONTAL DEVELOPMENTS	84
I. V. MIASNYKOV CONCRETE REINFORCEMENT WITH A SPECIAL FIBROUS MATERIAL WHEN MINE WORKINGS GUNNING	91
V. D. PETRENKO, V. V. KHARCHENKO, R. M. TERESHCHUK, O. M. PETROV DEPENDENCE OF STRAIN-DEFORMED STATE OF FOUNDATIONS AND BASES DURING THEIR RESTORATION ON THE BASIS OF GROUT-INJECTED PILE TECHNOLOGY	96

O. L. TIUTKIN, I. S. OSTAPENKO

STRENGTHENING OF THE FOUNDATIONS OF HIGHWAY BRIDGES

IN THE CONTEXT OF THE PROBLEMATIC STATE

OF THE TRANSPORTATION AND ROAD COMPLEX 106

A. I. YUKHYMENKO, R. V. SAMCHENKO

BASICS OF THE METHOD FOR RESTORING

THE DEFORMED STATE OF CONSTRUCTION OBJECTS 113

D. N. SMERDOV, M. O. YASHCHUK

LABORATORY STUDIES OF PRESTRESS LOSS

WHEN REINFORCING REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH COMPOSITE MATERIALS 119

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 502.174:[69:658.7/.8.012.34]

І. А. АРУТЮНЯН^{1*}, А. А. ШУВАЄВ²

^{1*} Кафедра «Промислове та цивільне будівництво», Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (066) 900 78 28, ел. пошта iranaarutunan@gmail.com, ORCID 0000-0002-5049-3742

² Кафедра «Промислове та цивільне будівництво», Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (096) 180 45 99, ел. пошта shywazp@gmail.com, ORCID 0000-0002-4919-485X

ЕКОЛОГІЧНО-ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ ВІДХОДІВ В БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ

Мета. Обґрунтування перспективних напрямів дослідження екологічно – економічної доцільності комплексного управління потоками відходів будівельної галузі, систематизація принципів такого управління, визначення існуючих тенденцій, аналіз підходів та напрямів вирішення проблеми управління відходами будівництва. **Методика.** Досягнення поставленої мети передбачає системний аналіз проблеми управління потоками відходів в будівельній галузі, який враховує актуальність проблеми, нормативне регулювання, наукові дослідження з цієї проблематики та передбачає створення ефективної моделі комплексного управління. **Результати.** В дослідженні обґрунтовано, що створення комплексної системи управління потоками відходів будівельної галузі, яка передбачає застосування методів планування, прогнозування та оцінки потоків будівельних відходів, здатна забезпечувати вирішення основних екологічних завдань в будівельній галузі: ефективного поводження з відходами, шляхом створення економічно доцільної, результативної і екологічно безпечної регіональної системи управління відходами. **Наукова новизна.** Визначені ключові принципи розроблення та функціонування моделі комплексної системи управління потоками відходів будівельної галузі: принцип екологічності всіх процесів в системі; принцип ефективності; принципи логістики; принцип вмотивованості. **Практична значимість.** Обґрунтування принципів створення моделі комплексного управління потоками будівельних відходів, доцільності застосування логістичного підходу, визначення змісту та структури вхідних інформаційних потоків на підставі системного аналізу та екологічної оцінки, є передумовою науково – методичного та практичного вирішення проблеми управління потоками відходів в будівельній галузі.

Ключові слова: комплексне управління; логістичний підхід; потоки будівельних відходів; рециклінг; регенерація; рекуперація

Вступ

Значні обсяги накопичених в Україні відходів та відсутність ефективних заходів, спрямованих на запобігання їх утворенню, утилізації, знешкодження та видалення, поглиблюють екологічну кризу і стають гальмівним фактором розвитку національної економіки.

Така ситуація обумовлює необхідність створення та забезпечення належного функціонування загальнодержавної системи запобігання утворенню відходів, збирання, перероблення та утилізації, знешкодження і екологічно безпечного видалення. Це повинно бути невідкладним завданням навіть в умовах відносної обмеженості економічних можливостей як держави, так і основних утворювачів відходів. Таким чином, єдиним можливим шляхом урегулювання ситу-

ації є створення комплексної системи управління відходами. Будівельна галузь регенерує величезну кількість відходів, які згодом стають забруднювачами прилеглих до міст і населених пунктів територій, і крім того, втрачається потенціал їх повторного використання та потенційного зниження собівартості будівництва.

Згідно Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року (від 8 листопада 2017 р. № 820-р), високий рівень утворення відходів та низький обсяг їх переробки, як вторинної сировини, спричиняє нагромадження значних обсягів твердих відходів, з яких лише незначна частина застосовується, як вторинні матеріальні ресурси, решта потрапляють на звалища.

На відміну від України, в інших розвинутих країнах мінімізовані обсяги утворення відходів та існує інфраструктура їх переробки. При цьо-

© І. А. Арутюнян, А.А. Шуваєв, 2020

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

му наявність такої інфраструктури є неодмінною ознакою всіх економік розвинутих країн. Важливим поштовхом для створення умов переробки відходів будівництва та знесення, є спеціальні європейські системи сертифікації будівель, такі як Німецька рада з екологічного будівництва (DGNB) та англійський Метод екологічної оцінки ефективності будівель (BREAM), американський стандарт (LEED).

Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року (від 8 листопада 2017 р. № 820-р), передбачає досягнення наступних цілей в сфері управління відходами будівництва:

- досягнення рівня переробки відходів будівництва та знесення (до 70 % до 2030 року);
- мінімізація матеріалів відходів будівництва та знесення (ціль – максимум 5% до 2030 року), які підлягають захороненню на звалищах;
- сортування шкідливих матеріалів (видалення всіх шкідливих відходів перед знесенням);
- запобігання та зменшення рівня виникнення відходів будівництва та знесення;
- заміна використання первинної сировини в секторі будівництва через збільшення використання вторинної сировини з відходів будівництва та знесення;
- зниження ризику, що походить від матеріалів, які містять азбест, та від використання інших шкідливих речовин (наприклад ПХД) серед компонентів будівлі та в будівництві;
- розвиток підгалузі управління відходами будівництва та знесення у межах ширшого будівельного ринку України.

Мета

Обґрунтування перспективних напрямів дослідження екологічно – економічної доцільності комплексного управління потоками відходів будівельної галузі, систематизація принципів такого управління, визначення існуючих тенденцій, аналіз підходів та напрямів вирішення проблеми управління відходами будівництва.

Методика

Досягнення поставленої мети передбачає системний аналіз проблеми управління потоками відходів в будівельній галузі, який враховує

актуальність проблеми, нормативне регулювання, наукові дослідження з цієї проблематики та передбачає створення ефективної моделі комплексного управління, спираючись на:

- статистичні дані про утворення, використання, знешкодження, транспортування та розміщення відходів і створення на цій основі бази даних про відходи виробництва і споживання;
- регіональні і місцеві баланси потоків відходів;
- оцінку потенційної (реальної) небезпеки для навколишнього середовища і здоров'я людей;
- аналіз наявних потенційних економічних, організаційних, технічних, технологічних та інших можливостей щодо мінімізації надходження відходів в природне середовище (роздільний збір, попередження забруднення території, втрат при транспортуванні та ін.);
- обґрунтування напрямів максимізації використання відходів для залучення їх у вторинний господарський оборот з урахуванням промислового потенціалу і умов регіону;
- аналіз найбільш оптимальних рішень напрямку будівельних відходів у вигляді вторинної сировини споживачам на основі принципу максимальної самоокупності діяльності щодо поводження з відходами, з урахуванням дотримання вимог екологічної безпеки;
- алгоритм дій щодо поводження з відходами з попередніми еколого-економічним обґрунтуванням кожного можливого варіанту управлінського рішення;
- вибір оптимальних рішень щодо формування потоків відходів на основі найбільш повного досягнення поставлених цілей з урахуванням фінансових, технічних ресурсів і можливих екологічних ризиків;

- можливості практичної реалізації моделі комплексної системи управління потоками відходів.

Вважаємо, що багато аспектів прийняття раціональних рішень по використанню відходів будівельного виробництва, в якості вторинних ресурсів, недостатньо обґрунтовані і вимагають наукового доопрацювання з урахуванням досягнень сучасної науки і техніки. Вибір ефективного напрямку руху будівельних відходів є запорукою успішного економічного розвитку будівельної індустрії регіонів країни.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Результати

Основними тенденціями в управлінні відходами будівельної галузі в Україні, на сьогодні, можемо вважати:

- використання здебільшого єдиної форми ліквідації відходів будівництва – захоронення на полігонах і відповідно – накопичення відходів, що має негативний вплив на екологію;
- здійснення неналежним чином сортування за класами небезпеки, утилізації та видалення небезпечних відходів;
- відсутність оцінки можливості небезпечних наслідків в процесі утилізації будівельних відходів;
- мінімальний рівень використання відходів, як вторинної сировини, недосконалість організаційно-економічних засад залучення їх у виробництво;
- відсутність законодавчого регулювання управління відходами будівництва, сертифікації будівельних матеріалів із перероблених відходів, стандартів виробництва, спрямованих на мінімізацію відходів та екологічність процесів будівництва;
- неефективність впроваджених економічних інструментів, стимулів, заходів контролю у сфері поводження з відходами.

Вирішення зазначеної проблеми та зміна негативних тенденцій, є ключовими у вирішенні питань енерго- та ресурсоемності будівельної галузі, економії природних матеріальних та енергетичних ресурсів, зниження енергомісткості, трудомісткості, матеріаломісткості і вартості будівельної продукції, покращення екологічності будівництва, а головне – актуальним стратегічним завданням (пріоритетом) державної політики у сфері регулювання будівельної галузі.

В даний час споживання будівельних відходів в якості сировини для будівельної індустрії дозволяє значно збільшити обсяги переробки відходів в корисні продукти і одночасно поліпшити екологічну обстановку.

Дослідження Хрутьба, Вайганг, & Крюковська, (2015), визначає, що домінуючим видом відходів, які утворюються в будівельних проєктах є надлишок від розкопок ґрунту, деревини і арматурних стержнів. Дослідження також показують відсутність можливості управління фактором виробництва будівельних відходів, на що

вказує кореляція між відходами виробництва та управлінськими аспектами.

Згідно дослідження Кропивний, Медведєва, & Кропивна, (2019), матеріали, які утворюються в результаті демонтажу будівель, можуть бути вивезені на полігони або піддатися утилізації, яка представляє собою використання відходів як вторинних матеріальних чи енергетичних ресурсів.

При цьому в дослідженні Kumbhar, Gupta, & Desai, (2013), виділяються наступні види утилізації:

- рециклінг – повторне застосування відходів за прямим призначенням, дозволяє зберегти природу від негативного впливу, та істотно знизити собівартість матеріалів та будівельних конструкцій;
- регенерація – повернення відходів у виробничий цикл після відповідної підготовки;
- рекуперація – витяг корисних компонентів для їх повторного застосування.

Слід зазначити, що такий традиційний спосіб поводження з відходами, як вивіз на полігони, є найбільш неефективним як з екологічної, так і з економічної точки зору, але як і раніше залишається домінуючим.

У дослідженні Шевченко, Т. Ю., Барна, М. Ю., & Назаренко, О. Ю. (2011), зазначено, що можливим варіантом вирішення цих проблем є рециклінг будівельних відходів.

Як зазначено у дослідженні Лялюк, О. Г., Ратушняк, & Лялюк, А. О. (2017), фактично, більша частина сміття, виробленого будівельною галуззю, підлягає вторинній переробці: Бетон, перероблений в щебінь, служить для застосування котлованів, а також для створення тимчасових доріг. Асфальт повторно застосовують у будівництві доріг, але спочатку його термічно обробляють при дуже високій температурі. Арматура так само повторно використовується в будівництві. Брак і склобій можна відправляти на переплавлення. Можливе застосування склобою в якості наповнювача в дорожньому будівництві для одержання будівельної кераміки, ударна міцність якої складає 0,83 кг/см². Цегла з використанням склобою (до 50...90 %) може застосовуватися в суворих кліматичних умовах. Відходи з дерева (на сьогодні 15 % піддаються переробці) можна використовувати після роздрібнення для одержання деревинно-цементної маси, із якої виробляють деревинно-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

цементні плити. Деталі з пресованої деревини служать у декілька разів довше, а їх вартість у 3...20 разів нижча. Макулатура в сполученні з органічними і неорганічними складниками використовується у виробництві різноманітних плит, теплоізоляційних панелей на основі перліту, порошкоподібного твердого, газоподібного палива, етанолу, азотного добрива з додаванням калію і кальцію. Пластмаса – переробляється, як покрівельна панель, заповнювач, штучний ґрунт і т. п. (Puskás, Corbu, Szilágyi, & Moga, 2014).

І це далеко не повний перелік асортименту можливого застосування будівельних відходів, який застосовуються в більшості західних країн.

Вважаємо, що проблему управління потоками відходів в будівельній галузі слід розглядати за двома напрямками: перший – з позиції забудовника, другий – з позиції галузі та державних інтересів. Зрозуміло, що ключовою метою забудовника – може бути лише підвищення ефективності будівництва, яке в умовах управління потоками відходів та їх повторного застосування, досягається за рахунок зниження витрат на матеріали, вартість робіт та логістичних витрат, а також податкового стимулювання. Варто наголосити, що екологічність будівництва, яка досягається ефективним управлінням відходами, надає забудовнику додаткових конкурентних переваг, в тому числі при участі в тендерах.

З позиції галузевих та державних інтересів, ключовою метою вважаємо досягнення екологічного ефекту (в тому числі, зниження обсягів звалищ), за який держава готова платити, шляхом надання пільг, преференцій та законодавчо регулювати ці процеси.

З урахуванням цього, першочерговими діями в цьому напрямку повинні стати:

- створення сучасної системи управління відходами та їх утилізації;
- забезпечення збалансованості економічних, екологічних та соціальних аспектів управління відходами;
- створення єдиної системи зі збору, використання в якості вторинної сировини у виробництві, переробці, утилізації відходів, формування і управління потоками будівельних відходів;

– зменшення обсягів утворення відходів; відмова від застосування в будівництві надзвичайно і високотоксичних будівельних матеріалів і виробів, що є джерелами утворення токсичних будівельних відходів;

– створення спеціалізованих підприємств по сортуванню, переробці відходів у вторинні ресурси;

– дотримання міжнародних та вітчизняних нормативно-правових актів в галузі екологічної та санітарно-гігієнічної безпеки, поведінки з відходами, раціонального використання природних ресурсів і охорони навколишнього середовища.

Вважаємо обґрунтованим, як зазначено у дослідженні Садов, & Цховребов, (2011), що управління відходами будівництва на рівні регіону, має будуватися на організації єдиної системи первинного виробничого обліку відходів, яка має стати первинним інформаційним потоком для комплексної системи управління будівельними відходами.

Відповідно, система первинного виробничого обліку відходів включає внутрішню поточну (оперативну) інформацію і полягає в кількісній оцінці утворення відходів на кожній технологічній операції, як за фактичними показниками обліку і методами матеріального балансу, статистичними та типовими аналоговими даними, так і за розрахунковими методиками, затвердженими в установленому порядку. Крім того, обов'язково необхідно враховувати екологічну оцінку життєвого циклу будівельних матеріалів, екологічну та санітарно – гігієнічну безпеку, як самого будівельного матеріалу в цілому, так і окремих компонентів, що можуть бути застосовані при регенерації та рекуперації.

В дослідженні Абрамова, & Бачуріна, (2008), зазначено, що екологічна оцінка життєвого циклу будівельного матеріалу або виробу враховує вплив на природне середовище та здоров'я людей не тільки самого матеріалу, але і процесів, які супроводжують його життєвий цикл (від видобутку сировини для його виробництва до його знищення, поховання, або повторного використання в новій будівельній продукції).

Оцінка екологічної безпеки будівельних матеріалів передбачає проведення системного аналізу (аналіз та математична оцінка вхідних і вихідних потоків сировини, розрахунок «еколо-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

гічного балансу», вплив матеріалу на середу та оцінку наслідків цих впливів) та доцільним є порівняльний аналіз (збір та оцінка експертної науково-практичної інформації щодо ступеня екологічної небезпеки і токсичності, можливості використання в якості вторинної сировини для виробництва будівельної продукції).

Здійснення системного та порівняльного аналізу, за допомогою якісних та кількісних методів дозволить розробити класифікую будівельної продукції, виробленої із будівельних відходів, визначити показники її якості, відповідність екологічним та санітарно – гігієнічним вимогам, сприяти розвитку технологій з підвищення якості цих матеріалів, і відповідно – специфікації та технологічні стандарти.

Таким чином, оцінка екологічної безпеки будівельних матеріалів, має стати базою формування вхідного інформаційного потоку в комплексному управлінні потоками будівельних відходів, що включає наступні види інформації:

- екологічну (ступінь небезпеки відходу для природного середовища);
- матеріальну (величина витрат і втрат матеріально-сировинних ресурсів);
- економічну (фінансові втрати і збитки, ризику);
- санітарно-гігієнічну (ступінь токсичності і вплив на здоров'я людини).

Внутрішня інформація системи, повинна обов'язково бути доповнена зовнішньою інформацією: науково-технічною та нормативно-правовою. Така інформація має стати основою для економіко-математичного моделювання потоків будівельних відходів та створення логістичної моделі комплексної системи управління будівельними відходами.

Ключовими принципами функціонування такої моделі, вважаємо:

- принцип екологічності всіх процесів в системі (мінімізація рівня утворення та захоронення відходів будівельної галузі);
- принцип ефективності (зниження ресурсоемності будівництва, собівартості матеріалів, транспортних витрат, витрат на утилізацію відходів та ін.);

Як підкреслено в дослідженні Радкевич, Арутюнян, Данкевич, & Сайков, (2017), організаційний інструментарій впровадження оптимізаційних моделей, безпосередньо, є різноманіт-

ним, але певна модель повинна затверджуватися в рамках управлінських рішень з обов'язковим визначення її ефективності.

- принципи логістики (раціональності, емерджентності, системності, ієрархії та інтеграції, конкретності, науковості, конструктивності);

- принцип вмотивованості (мотивація та обґрунтування доцільності процесів управління будівельними відходами для усіх стейкхолдерів системи).

Тобто логістичний підхід полягає в системному розгляді сукупності процесів з позиції єдиного ланцюга матеріально-сировинного балансу, інтеграція окремих ланок цього ланцюга здійснюється на технічному, технологічному, економічному і методологічному рівнях, а мінімізація витрат часу і ресурсів досягається оптимізацією управління матеріальними і інформаційними потоками, як зазначено у дослідженні Алімова (2009).

Зазначимо, що розгляд проблеми управління відходами будівельної галузі можливий як на рівні окремого підприємства (забудовника, будівельного об'єкта) так і на регіональному та галузевому (державному) рівнях.

Перший рівень є не оптимізованим з точки зору комплексного управління відходами та вирізняється від другого та третього відсутністю централізованої функції управління розрізненими потоками, технологічної, економічної і нормативно-методологічної інтеграції окремих ланок матеріально-сировинного ланцюга в єдину систему, що забезпечує ефективне управління потоками відходів.

Тому вважаємо, що пріоритетним є створення саме комплексного управління потоками будівельних відходів, при цьому, враховуючи можливості та доцільність такого децентралізованого управління на першому рівні, що дозволить комплексно знизити рівень негативного впливу на екологію, забезпечити гнучкість системи у відповідності із економічною доцільністю, нормативними, технічними, екологічними та санітарними вимогами.

Комплексність управління потоками дозволить знизити ризики мінливості, сезонності, економічні ризики в будівельній галузі, забезпечить можливість більш ефективного пошуку споживачів вторинних ресурсів.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Вважаємо, що це дозволить мінімізувати запаси накопичення відходів на будівельних майданчиках, скоротити час транспортування відходів, оптимізувати ведення баз даних щодо обертів відходів, забезпечуючи своєчасну передачу інформації, а відповідно, буде реалізований принцип вмотивованості для окремих забудовників. Таким чином, це в цілому дозволить досягти економічного ефекту від залучення у вторинний господарський оборот залишків сировини, матеріалів, сприяти підвищенню рівня екологічної безпеки, зниження екологічних ризиків.

Комплексне управління потоками будівельних відходів з використання логістичного підходу, передбачає, що об'єктом управління виступає наскрізний потік оборотних відходів, а відокремленість джерел утворення відходів (першого рівня) і об'єктів, що приймають ці відходи, як вторинну сировину, коригується шляхом організації єдиної системи управління і регулювання потоками відходів. Рух такого потоку по всьому ланцюгу при використанні логістичного методу сприятиме мінімізації витрат на транспортування.

На виході системи, параметри потоків відходів можуть бути визначені, як прогнозовані, контрольовані екологічні, технічні та економічні показники, відображені в єдиній системі баз (системі) комплексного управління відходами (Алексанин, 2014).

Структурно-логічна комплексна модель відображає взаємозв'язок інформаційних модулів, повних функцій управління та очікуваних станів системи (Павлов, І. Д., Полтавець & Павлов, Ф. І., 2020).

Відповідно, виходячи із вищевикладеного, зауважимо, що створення комплексної системи управління потоками відходів будівельної галузі, яка передбачає застосування методів планування, прогнозування та оцінки потоків будівельних відходів, здатна забезпечувати вирішення основних екологічних завдань в будівельній галузі: ефективного поводження з відходами, шляхом створення економічно доцільної, результативної і екологічно безпечної регіональної системи управління відходами.

Крім того, це сприятиме розвитку економічно ефективної галузі економіки, пов'язаної з використанням і переробкою відходів виробництва і споживання; охороні навколишнього се-

редовища та захисту населення від негативного впливу відходів виробництва і споживання, поліпшенню санітарного стану території регіонів; раціональному використанню природних ресурсів, ресурсозбереженню; мінімізації втрат цінних речовин, що містяться у будівельних відходах, зменшення витрат, спрямованих на ліквідацію наслідків забруднення навколишнього середовища небезпечними відходами.

Наукова новизна та практична значимість

Обґрунтування принципів створення моделі комплексного управління потоками будівельних відходів, доцільності застосування логістичного підходу, визначення змісту та структури вхідних інформаційних потоків на підставі системного аналізу та екологічної оцінки, є передумовою науково – методичного та практичного вирішення проблеми управління потоками відходів в будівельній галузі.

Висновки

Визначені в дослідженні сучасні тенденції в управлінні відходами будівельної галузі в Україні, є негативними з точки зору екологічності та економічної ефективності будівельної галузі та потребують змін.

Вважаємо, перспективними напрямками дослідження та вирішення проблеми управління відходами в будівельній галузі, є розробка технологій, створення моделей управління на основі логістичного підходу, які стимулюватимуть підвищення частки використання відходів будівництва і зносу, сприятимуть підвищенню ефективності будівництва, зменшуючи шкідливий вплив на екологію, та повинні бути реалізовані в межах комплексного управління потоками відходів будівельної галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Kumbhar, S., Gupta, A., & Desai, D. (2013). Recycling and reuse of construction and demolition waste for sustainable development. *OIDA International Journal of Sustainable Development*, 6(7), 83-92.
- Puskás, A., Corbu, O., Szilágyi, H., & Moga, L. M. (2014). Construction waste disposal practices: The recycling and recovery of waste. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 191, 1313-1321.
- Абрамова, М. В., & Бачурина, Н. Д. (2008). Сетевая модель управления потоками отходов. *Вестник*

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Восточноукраинского университета им. В. Даля*, 3, 121.
- Александр, А. В. (2014). Автоматизация управления отходами строительного производства. *Промышленное и гражданское строительство*, 10, 79-81.
- Алимов, А. Х. (2009). Использование возможностей логистики в модернизации работы с отходами производства (логистика отходов). *РИСК: ресурсы, информация, снабжение, конкуренция*, 1, 37-39.
- Павлов, І. Д., Полтавець, М. О., & Павлов, Ф. І. (2020). Системне управління організаційно-технологічною надійністю виробничих процесів в будівництві. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 17, 53-61.
- Кропівний, В. М., Медведєва, О. В., & Кропівна, А. В. (2019). *Утилізація та рекуперація відходів*. Кропивницький: Лисенко В. Ф.
- Лялюк, О. Г., Ратушняк, О. Г., & Лялюк, А. О. (2017). Екологічний менеджмент відходів будівельного виробництва. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 22(1), 94-100.
- Радкевич, А. В., Арутюнян, І. А., Данкевич, Н. О., & Сайков, Д. В. (2017). Детермінація концептуальних підходів щодо облігаторності впровадження оптимізаційних моделей будівельного виробництва для вітчизняних підрядних підприємств. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 12, 78-86.
- Розпорядження Кабінету міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р., «Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року».
- Садов, А. В., & Цховребов, Э. С. (2011). Пути решения проблемы обращения с отходами на уровне региона. *Вестник РАЕН*, 11(5), 29-31.
- Хрутьба, В. О., Вайганг, Г. О., & Крюковська, Л. І. (2015). Визначення показників екологічної безпеки проектів використання відходів як дорожньо-будівельного матеріалу. *Технологический аудит и резервы производства*, 4(4), 64-71.
- Шевченко, Т. Ю., Барна, М. Ю., & Назаренко, О. Ю. (2011). Рециклінг будівельних відходів. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 9(162).

І. А. АРУТЮНЯН^{1*}, А. А. ШУВАЕВ²

^{1*} Кафедра «Промышленное и гражданское строительство», Запорожский национальный университет, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38 (066) 900 78 28, эл. почта iranaarutunan@gmail.com, ORCID 0000-0002-5049-3742

² Кафедра «Промышленное и гражданское строительство», Запорожский национальный университет, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38 (096) 180 45 99, эл. почта shywazp@gmail.com, ORCID 0000-0002-4919-485X

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ОТХОДОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Цель. Обоснование перспективных направлений исследования экологически-экономической целесообразности комплексного управления потоками отходов в строительной отрасли, систематизация принципов такого управления, определение существующих тенденций, анализ подходов и направлений решения проблемы управления отходами строительства. **Методика.** Достижение поставленной цели предполагает системный анализ проблемы управления потоками отходов в строительной отрасли, который учитывает актуальность проблемы, нормативное регулирование, научные исследования по этой проблематике и предусматривает создание эффективной модели комплексного управления. **Результаты.** В исследовании обосновано, что создание комплексной системы управления потоками отходов в строительной отрасли, которая предусматривает применение методов планирования, прогнозирования и оценки потоков строительных отходов, способна обеспечивать решение основных экологических задач в строительной отрасли: эффективного обращения с отходами, путем создания экономически целесообразной, результативной и экологически безопасной региональной системы управления отходами. **Научная новизна.** Определены ключевые принципы разработки и функционирования модели комплексной системы управления потоками отходов строительной отрасли: принцип экологичности всех процессов в системе; принцип эффективности; принципы логистики; принцип мотивированности. **Практическая значимость.** Обоснование принципов создания модели комплексного управления потоками строительных отходов, целесообразности применения логистического подхода, определения содержания и структуры входных информационных потоков на основе системного анали-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

за и экологической оценки, является предпосылкой научно-методического и практического решения проблемы управления потоками отходов в строительной отрасли.

Ключевые слова: комплексное управление; логистический подход; потоки строительных отходов; рециклинг; регенерация; рекуперация

I. A. ARUTIUNIAN^{1*}, A. A. SHUVAEV²

^{1*} Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi ave., Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (066) 9007828, e-mail iranaarutunan@gmail.com, ORCID 0000-0002-5049-3742

² Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi ave., Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (096) 180 45 99, e-mail shywazp@gmail.com, ORCID 0000-0002-4919-485X

ENVIRONMENTALLY-ECONOMIC FEASIBILITY OF INTEGRATED MANAGEMENT OF WASTE FLOWS IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Purpose. Substantiation of promising areas of research on the environmental and economic feasibility of integrated management of waste streams in the construction industry, systematization of the principles of such management, identification of existing trends, analysis of approaches and directions for solving the problem of construction waste management. **Methodology.** Achieving this goal involves a systematic analysis of the problem of waste management in the construction industry, which takes into account the relevance of the problem, regulatory regulation, scientific research on this issue and provides for the creation of an effective integrated management model. **Results.** The study substantiates that the creation of an integrated waste management system in the construction industry, which provides for the use of planning, forecasting and assessment methods for construction waste streams, is able to provide a solution to the main environmental problems in the construction industry: effective waste management by creating an economically viable, efficient and environmentally friendly regional waste management system. **Originality.** The key principles for the development and functioning of a model of an integrated waste management system for the construction industry have been determined: the principle of environmental friendliness of all processes in the system; the principle of efficiency; principles of logistics; the principle of motivation. **Practical value.** Substantiation of the principles of creating a model for integrated management of construction waste streams, the feasibility of using a logistic approach, determining the content and structure of input information flows based on system analysis and environmental assessment, is a prerequisite for a scientific, methodological and practical solution to the problem of waste management in the construction industry.

Keywords: integrated management; logistic approach; construction waste streams; recycling; regeneration; recovery

REFERENCES

- Kumbhar, S., Gupta, A., & Desai, D. (2013). Recycling and reuse of construction and demolition waste for sustainable development. *OIDA International Journal of Sustainable Development*, 6(7), 83-92. (in English)
- Puskás, A., Corbu, O., Szilágyi, H., & Moga, L. M. (2014). Construction waste disposal practices: The recycling and recovery of waste. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 191, 1313-1321. (in English)
- Abramova, M. V., & Bachurina, N. D. (2008). Setevaya model upravleniya potokami otkhodov. *Vestnik Vostochnoukrainskogo universiteta im. V. Dalya*, 3, 121. (in Russian)
- Aleksanin, A. V. (2014). Avtomatizatsiya upravleniya otkhodami stroitel'nogo proizvodstva. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 10, 79-81. (in Russian)
- Alimov, A. Kh. (2009). Ispolzovanie vozmozhnostey logistiki v modernizatsii raboty s otkhodami proizvodstva (logistika otkhodov). *RISK: resursy, informatsiya, snabzhenie, konkurentsia*, 1, 37-39. (in Russian)
- Pavlov, I. D., Poltavets, M. O., & Pavlov, F. I. (2020). Systemne upravlinnia orhanizatsiino-tekhnohichnoi na-diinistiu vyrobnychkh protsesiv v budivnytstvi. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 17, 53-61. (in Ukrainian)
- Kropivnyi, V. M., Medvedieva, O. V., & Kropivna, A. V. (2019). Utylizatsiia ta rekuperatsiia vidkhodiv. *Kropyvnytskyi: Lysenko V. F.* (in Ukrainian)
- Lialiuk, O. H., Ratushniak, O. H., & Lialiuk, A. O. (2017). Ekolohichniy menedzhment vidkhodiv budivelnoho vyrobnytstva. *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktсии v budivnytstvi*, 22(1), 94-100. (in Ukrainian)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Radkevych, A. V., Arutiunian, I. A., Dankevych, N. O., & Saikov, D. V. (2017). Determinatsiia kontseptualnykh pidkhodiv shchodo oblihatornosti vprovadzhennia optymizatsiinykh modelei budivelnoho vyrobnytstva dlia vitchyznia-nykh pidriadnykh pidpriemstv. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 12, 78-86. (in Ukrainian)

Rozporiadzhennia Kabinetu ministriv Ukrainy vid 8 lystopada 2017 r. № 820-r., «Pro skhvalennia Natsionalnoi stratehii upravlinnia vidkhodamy v Ukraini do 2030 roku». (in Ukrainian)

Sadov, A. V., & Tskhovrebov, E. S. (2011). Puti resheniya problemy obrashcheniya s otkhodami na urovne regiona. *Vestnik RAYeN*, 11(5), 29-31. (in Russian)

Khrutba, V. O., Vaihanh, H. O., & Kriukovska, L. I. (2015). Vyznachennia pokaznykiv ekolohichnoi bezpeky proektiv vykorystannia vidkhodiv yak dorozhno-budivelnoho materialu. *Tekhnologicheskyy audit i rezervy proizvodstva*, 4(4), 64-71. (in Ukrainian)

Shevchenko, T. Yu., Barna, M. Yu., & Nazarenko, O. Yu. (2011). Retsyklinh budivelnykh vidkhodiv. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, 9(162). (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 05.10.2020.

Прийнята до друку 26.10.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624. 21.159.2

Л. А. ВАСИЛЬЧУК^{1*}, А. Н. ЯШНОВ²

^{1*} СибНИИ мостов, отдел Диагностики и мониторинга мостов, Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191/3, Новосибирск, Россия, 630049, тел. +7 (913) 205 29 54, эл. почта vasilchuck97@mail.ru, ORCID 0000-0001-6332-4211

² Кафедра «Мосты», Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, Новосибирск, Россия, 630049, тел. +7 (903) 901 64 01, эл. почта yan@stu.ru, ORCID 0000-0001-7435-3376

ДИАГНОСТИКА ПОДМЫВОВ ОПОР МОСТОВ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Цель. С целью обоснования возможности своевременного обнаружения подмывов опор путем фиксации и анализа изменений динамических параметров конструкций авторами были выполнены расчетные и экспериментальные исследования зависимости собственных частот колебаний опор от условий взаимодействия с грунтовым основанием. **Методика.** Для достижения поставленной цели был проанализирован опыт проведения мониторинга технического состояния конструкций, в том числе и по динамическим параметрам. Определены динамические характеристики опор, которые могут служить индикатором для выявления подмывов. Проведены численные и натурные эксперименты для выявления зависимости динамических параметров опоры от степени развития местного размыва. **Результаты.** Выделен параметр – частота свободных колебаний, который подвержен существенным изменениям при изменении условий взаимодействия опоры с грунтовым основанием. По результатам расчетов выявлены зависимости собственной частоты колебаний от степени подмыва для опор на свайном фундаменте и на фундаменте мелкого заложения. Опытным путем подтверждена возможность выявления развития подмыва опоры по частоте свободных колебаний с помощью датчиков-акселерометров измерительной системы «Тензор МС». Также на основании расчетов определено, что по изменениям частот колебаний опоры можно определить не только наличие подмыва, но и его местоположение. **Научная новизна.** Впервые предложен метод выявления подмывов опор по динамическим параметрам. **Практическая значимость.** Внедрение непрерывного автоматизированного измерения динамических параметров опор позволит своевременно определять развитие подмывов и принимать меры по их устранению или предотвращению дальнейшего развития, что поспособствует недопущению возникновения неожиданных аварийных ситуаций.

Ключевые слова: подмыв опоры; непрерывный автоматизированный мониторинг; динамические параметры; частота свободных колебаний; измерительная система «Тензор МС»; датчик-акселерометр

Введение

В июне 2020 года при повышении уровня и скорости течения воды, вызвавшего подмыв и крен опоры на одном из мостов на сети железных дорог России, произошло обрушение пролетных строений. Подобные аварийные ситуации происходили и раньше, например, в 2011 году было обрушение конструкций на мосту через р. Абакан. В связи с этим остро встает вопрос о необходимости своевременного выявления подмыва и принятии мер по его устранению или предотвращению дальнейшего развития.

Периодичность обследования водолазной станцией, при котором может быть выявлено состояние подводной части опор, в том числе и подмывы, составляет один раз в 10 лет, мосто-

испытательной станцией – один раз в 5 лет. Кроме того, согласно Инструкции по содержанию искусственных сооружений в систему надзора входят: осмотры, осуществляемые работниками, назначенными к обходу (квалифицированными монтерами пути, ремонтниками искусственных сооружений); текущие осмотры, выполняемые мостовыми мастерами или бригадами; периодические осмотры под руководством начальника предприятия, обслуживающего искусственные сооружения, или его заместителей. В период ливней и пропуска паводковых вод опасные по размыву сооружения осматриваются в соответствии с разрабатываемыми на такой период мероприятиями, как правило, не реже двух раз в год (до паводка и после паводка). Тем не менее, существующая

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

система периодического мониторинга состояния конструкций не исключает полностью возможность возникновения неожиданных аварийных ситуаций с тяжелыми последствиями.

Поэтому для опасных по размыву сооружений оправдана организация непрерывного автоматизированного мониторинга. Естественно, что обнаружение и оценка подмывов основания опор возможны и с помощью современных эхолотов, но проблема в том, что при паводке работы в русле затруднены, и диагностика все равно будет производиться дискретно.

Цель

Цель исследования – обосновать возможность своевременного обнаружения подмывов опор на основе организации системы автоматизированного мониторинга изменения динамических параметров конструкций, в первую очередь, собственных частот колебаний.

Методика

Возможность диагностирования неисправностей по изменению динамических параметров конструкции отмечалась различными авторами (Цветков, 2008; Бокарев, & Цветков, 2010; Слюсарь, & Яшнов, 2004; Глушков, Соловьев, & Донец, 2011; Чаплин, 2016; Бондарь, 2019; Васильчук, 2020). С практической точки зрения интерес представляет измерение таких диагностических параметров, как частота и форма свободных колебаний. Как известно, частота свободных колебаний конструкции зависит от изгибной жесткости (EI) и распределенной массы (m). При абсолютно жесткой заделке частота основного тона колебаний консоли длиной l может быть определена по формуле (1):

$$v = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}. \quad (1)$$

Очевидно, что при изменении условий взаимодействия опоры с грунтовым основанием будет изменяться и собственная частота колебаний системы.

Для обоснования возможности контроля местного размыва по частоте свободных колебаний были выполнены расчеты промежуточной опоры двухпутного железнодорожного моста на одном из участков Западно-Сибирской

железнодорожной дороги методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе Midas Civil. Моделирование тела опоры и свай выполнено балочными конечными элементами (КЭ), ростверка – объемными КЭ с применением жестких связей для совместной работы элементов опоры. Для моделирования взаимодействия с грунтом использованы одноузловые граничные элементы (опоры типа пружины) с заданными жесткостями закрепления фундамента от горизонтальных перемещений. Жесткости пружины в узле конечного элемента по направлению горизонтальных осей определены по формуле (2).

$$SD_x = SD_y = K \cdot z \cdot b_p \cdot l_{кэ}, \quad (2)$$

где K – коэффициент пропорциональности грунта, кН/м^4 ;

z – глубина от расчетной поверхности грунта (если ростверк расположен над грунтом) или от подошвы ростверка до точки, в которой устанавливается упругая связь, м;

$b_p = 1,5d + 0,5$ – приведенная ширина свай (ростверка), м;

$l_{кэ}$ – длина сбора нагрузки на узел конечного элемента, м;

d – диаметр свай или сторона прямоугольного сечения ростверка в плоскости, перпендикулярной действию нагрузки, м.

Вертикальная жесткость SD_z на подошве свай в первом приближении может быть задана равной бесконечности.

Модель промежуточной опоры представлена на рис. 1.

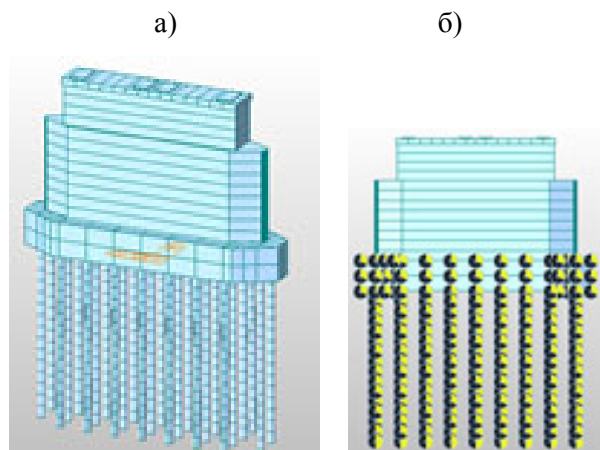


Рис. 1. Модель промежуточной опоры:
а) общий вид; б) взаимодействие с грунтом

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Для выявления изменений частоты свободных колебаний при увеличении подмыва опоры были рассмотрены следующие случаи:

- 1) равномерный подмыв по всей ширине опоры с увеличением глубины размыва;
- 2) локальный размыв части опоры с увеличением ширины размыва.

Расчеты собственных частот колебаний выполнены при загрузке опоры собственным весом и весом пролетных строений. По результатам расчетов анализируется частота по первой форме колебаний, которая является горизонтальной в продольном направлении моста (рис. 2).

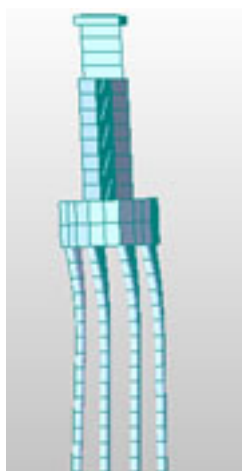


Рис. 2. Первая форма колебаний промежуточной опоры

Экспериментальные исследования выполнялись на металлическом железнодорожном мосту с помощью измерительной системы (ИС) «Тензор МС» (рис. 3), разработанной в Сибирском государственном университете путей сообщения (Бокарев, Мочалкин, Снежков, & Яшнов, 2004; Бокарев, Снежков, & Яшнов, 2007).



Рис. 3. Измерительная система «Тензор МС»

Датчики-акселерометры устанавливались на опорные листы опорных частей. Опоры выводились из равновесия при проходе подвижной нагрузки (ВЛ80С). Записи виброграмм произведены на опоре № 2 с зафиксированным подмывом около 1,5 метров и на аналогичных по конструкции опорах №№ 3 и 4, не имеющих подмывов.

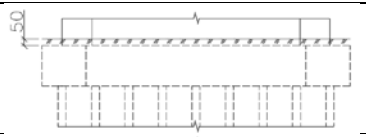
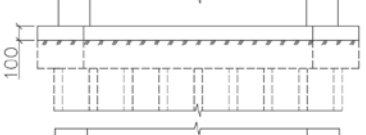
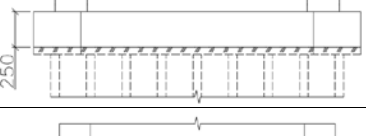
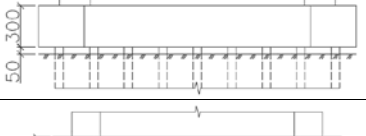
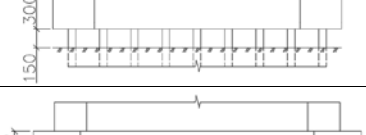
Результаты

Результаты расчетов частоты свободных колебаний при равномерном подмыве по всей ширине опоры сведены в табл. 1.

По результатам расчетов построен график зависимости собственной частоты колебаний опоры от глубины подмыва (рис. 4). Построение линии экспоненциального тренда при равномерном подмыве можно считать достоверным (величина достоверной аппроксимации равна 0,9907).

Таблица 1

Собственные частоты колебаний опоры при равномерном подмыве

Характер подмыва	Собственная частота колебаний, Гц
	2,90
	2,44
	1,75
	1,26
	1,03
	0,83

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

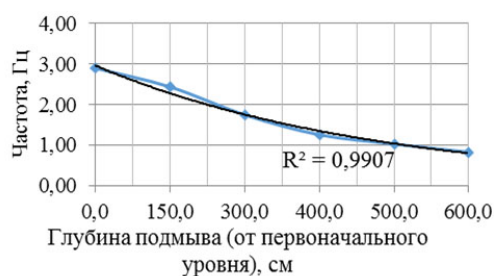


Рис. 4. График зависимости собственной частоты колебаний по основному тону от глубины подмыва опоры

Также был рассмотрен случай локального подмыва с его развитием по ширине опоры. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Частоты свободных колебаний при локальном размыве с развитием по ширине опоры

Характер подмыва	Собственная частота колебаний, Гц
	2,82
	2,75
	2,71
	2,63
	2,52
	2,15
	1,57

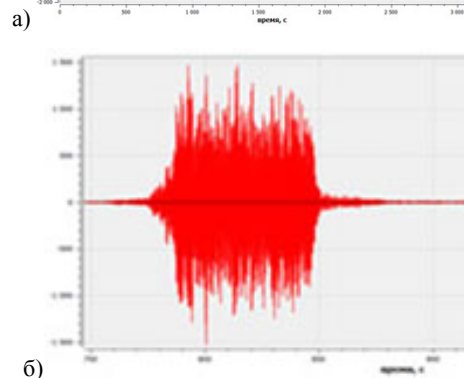
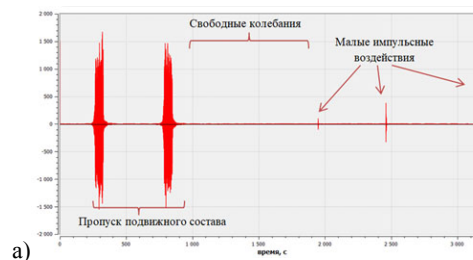
По результатам расчетов построен график зависимости частоты свободных колебаний опоры от ширины подмыва (рис. 5). Построение линии полиномиального тренда при локальном подмыве можно считать достоверным (величина достоверной аппроксимации равна 0,9987).

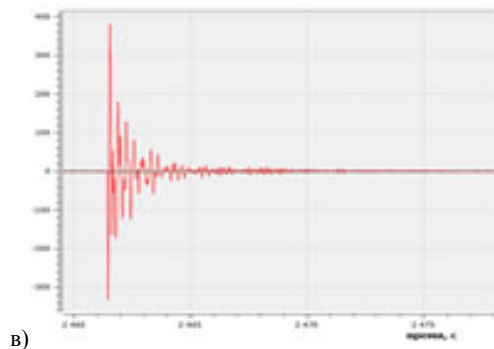


Рис. 5. График зависимости собственной частоты колебаний основного тона от ширины подмыва опоры

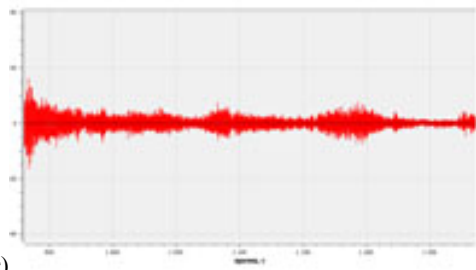
Возможность выявления изменения собственных частот колебаний от степени подмыва опоры была подтверждена опытным путем.

По результатам натурных измерений с помощью датчиков-акселерометров были получены виброграммы ускорений для опоры с подмывом (рис. 6) и для опор без подмыва (рис. 8). Определены участки пропуска подвижного состава, свободных колебаний после снятия нагрузки и малых импульсных воздействий (Яшнов, & Снежков, 2019), получены соответствующие графики функций спектральных плотностей мощности (СПМ) (рис. 7 и 9).



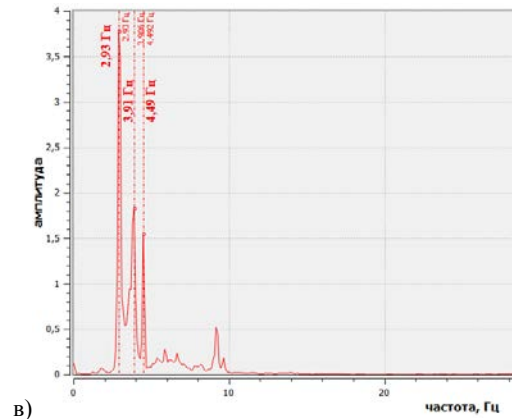


в)

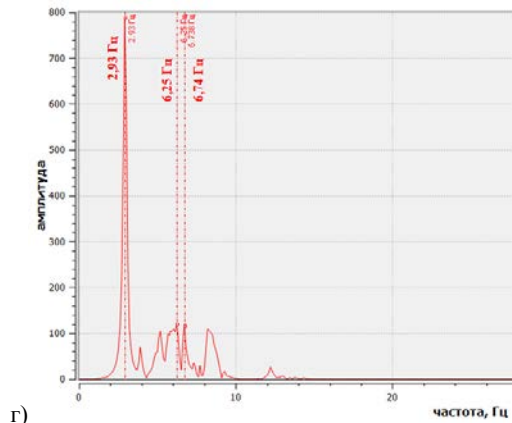


г)

Рис. 6. Виброграмма ускорений опоры № 2:
 а) полная запись с вибродатчика; б) участок пропуска ВЛ80С; в) малое импульсное воздействие; г) свободные колебания после снятия нагрузки

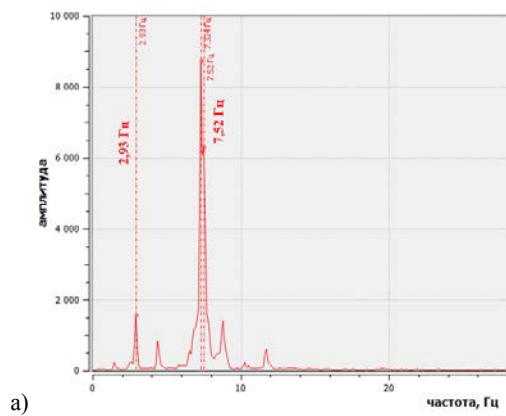


в)

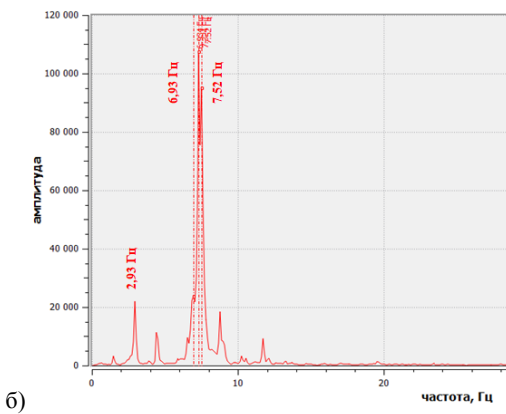


г)

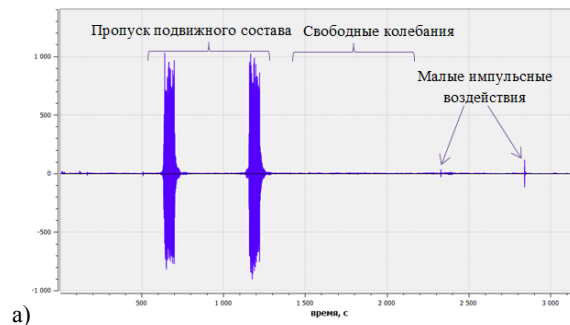
Рис. 7. Спектрограммы для опоры № 2:
 а) полная запись с вибродатчика; б) пропуск ВЛ80С;
 в) свободные колебания; г) малое импульсное воздействие



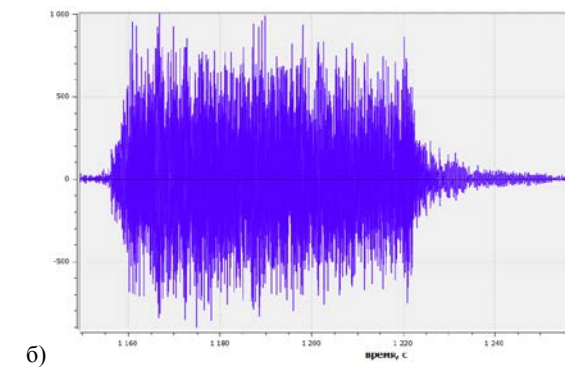
а)



б)

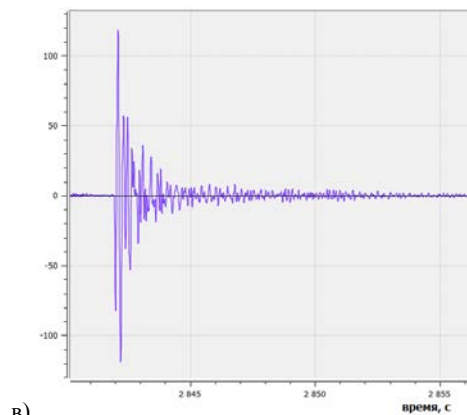


а)

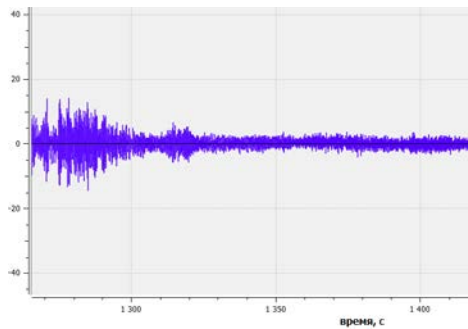


б)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

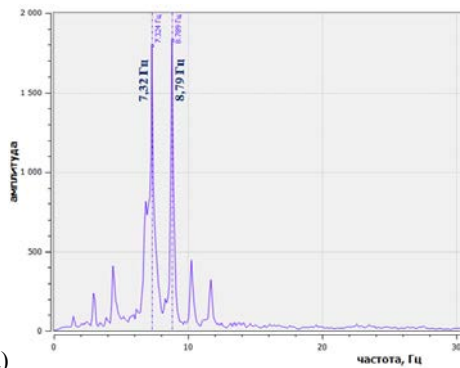


в)

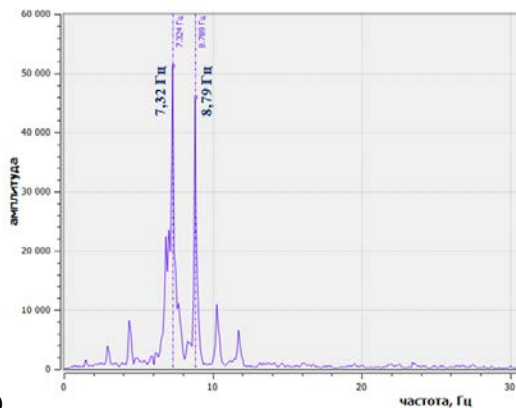


г)

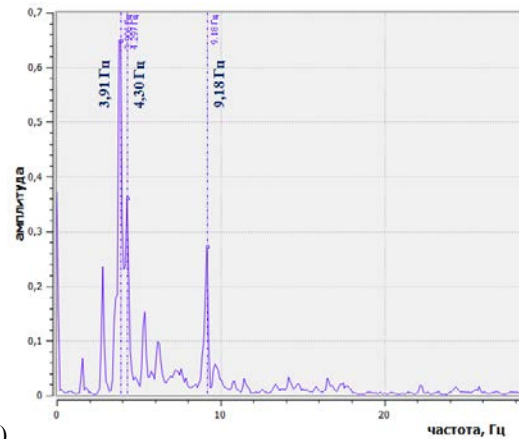
Рис. 8. Виброграмма ускорений опоры № 4:
а) полная запись с вибродатчика; б) участок пропуска ВЛ80С; в) малое импульсное воздействие; г) свободные колебания после снятия нагрузки



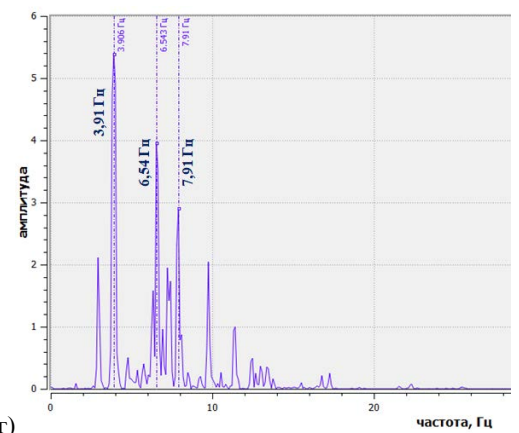
а)



б)



в)



г)

Рис. 9. Спектрограммы для опоры № 4:
а) полная запись с вибродатчика; б) пропуск ВЛ80С;
в) свободные колебания; г) малое импульсное воздействие

После обработки записанных сигналов в ПО *tenzor2* были получены частоты свободных колебаний для опоры № 2 с подмывом около 1,5 метров и для опор № 3,4 без подмыва (табл. 3). Изменение частоты колебаний для опоры с подмывом составило около 25 %.

Таблица 3

Опытные частоты свободных колебаний

Опора	Частота свободных колебаний, Гц
Опора №2 (с подмывом)	2,83
Опора №3 (без подмыва)	3,81
Опора №4 (без подмыва)	3,91

Из полученных результатов следует вывод, что изменение частоты свободных колебаний может служить сигналом о появлении подмыва опоры и позволит своевременно приступить к

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

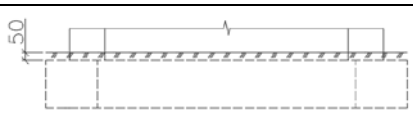
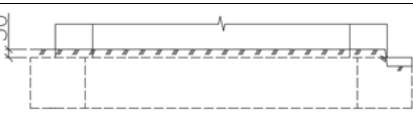
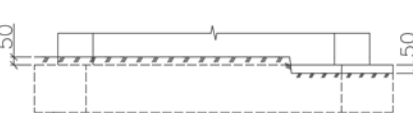
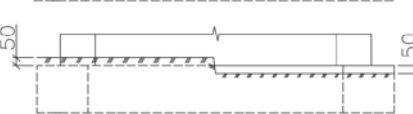
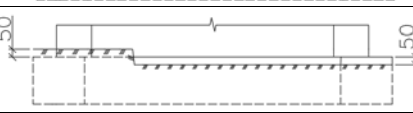
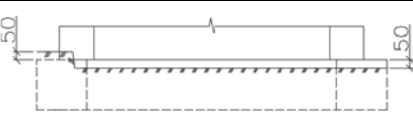
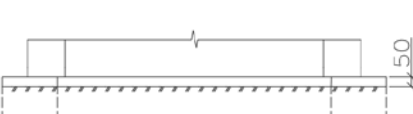
принятию мер по его устранению, что позволит не допускать аварийных ситуаций.

Следует отметить, что отличие натуральных частот колебаний от расчетных может быть объяснено принятием в расчетах условных характеристик грунта из-за отсутствия достоверных сведений о геологическом строении основания. Уточнение коэффициента пропорциональности грунта в конечно-элементных моделях позволит получить расчетные частоты, совпадающие с экспериментальными.

Также в ходе исследований методика была опробована для фундаментов мелкого заложения. Рассмотрен случай постепенного изменения отметки дна около ростверка с его развитием по ширине опоры. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Таблица 4

Частоты свободных колебаний при локальном размыве по ширине опоры на фундаменте мелкого заложения

Характер подмыва	Частота свободных колебаний, Гц
	7,76
	7,75
	7,72
	7,66
	7,61
	7,55
	7,50

По результатам расчетов построен график зависимости частоты свободных колебаний опоры от ширины подмыва (рис. 10).

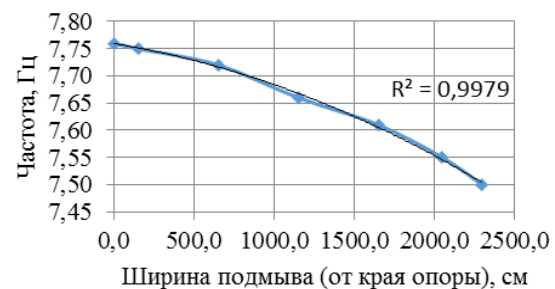


Рис. 10. График зависимости частоты свободных колебаний от ширины подмыва опоры на фундаменте мелкого заложения

Построение линии полиномиального тренда при локальном подмыве фундамента мелкого заложения можно считать достоверным (величина достоверной аппроксимации равна 0,9979).

Значительное увеличение частоты свободных колебаний для опоры на фундаменте мелкого заложения связано с изменением формы колебания конструкции при заданных условиях опирания.

Для выявления местоположения локального размыва были рассмотрены изменения частоты свободных колебаний при загрузке по отдельности железнодорожных путей двухпутного моста. Модель промежуточной опоры загружалась обрабатываемой нагрузкой С10. Загрузка железнодорожных путей производилась поочередно: сначала путь со стороны подмыва, потом – с противоположной стороны. Полученные результаты (табл. 5) позволяют сделать вывод, что по изменениям частот колебаний опоры можно определить не только наличие подмыва, но и его местоположение.

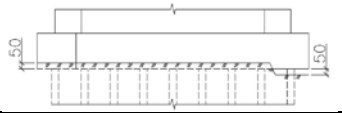
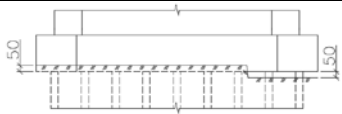
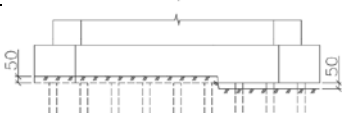
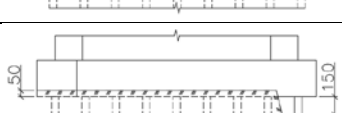
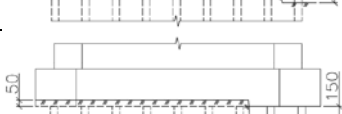
Научная новизна и практическая ценность

Внедрение непрерывного автоматизированного измерения динамических параметров опор позволит своевременно выявлять подмывы и принимать меры по их устранению или предотвращению дальнейшего развития, что способствует недопущению возникновения неожиданных аварийных ситуаций. Методика выявления подмывов опор по динамическим параметрам предложена впервые.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблица 5

Частоты свободных колебаний при локальном размыве по ширине опоры при загрузке подвижной нагрузкой

Характер подмыва	Частота свободных колебаний при загрузке пути, Гц:	
	со стороны подмыва	на противоположной стороне
	1,35	1,49
	1,28	1,36
	1,23	1,33
	1,34	1,39
	1,23	1,33
	1,14	1,26

Выводы

Таким образом, проведенные численные и натурные эксперименты подтвердили возможность организации системы непрерывного автоматизированного мониторинга для своевременного выявления развития подмывов опор с помощью датчиков-акселерометров. В дальнейшем предлагаемый метод диагностики и мониторинга может быть дополнен измерением кренов опор с помощью датчиков-инклинометров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Larocca, A. P. C., Schaal, R. E., & Santos, M. C. (2005). Monitoring of dynamic behavior of sus-

pension bridge on high-frequency GPS-data. *GPS World*.

Yashnov, A. & Chaplin, I. (2018). *Specifics of determining the tension forces of the cable-stayed bridge elements*, *Siberian Transport Forum – TransSiberia, MATEC Web of Conferences*, vol. 239, 05011.

Yashnov, A. & Kuzmenkov P. (2018). *Innovative aspects in developing bridge monitoring systems*, *X International Scientific and Technical Conference “Polytransport Systems”*. *MATEC Web of Conferences*, vol. 216, 01009. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601009>

Бокарев, С. А., Мочалкин, П. С., Снежков, И. И. & Яшнов, А. Н. (2004). Перспективы применения карманных компьютеров при строительстве и эксплуатации. *Вестник мостостроения*, 3(4), 37-39.

Бокарев, С. А., Снежков, И. И. & Яшнов, А. Н. (2007). Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО. *Путь и путевое хозяйство*, 9, 25.

Бокарев, С. А. & Цветков, Д. Н. (2010). Экспресс-оценка технического состояния эксплуатируемых сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов по динамическим параметрам. *Известия Транссиба*, 1, 98-99.

Бондарь, И. С. (2019). *Вибродиагностика балочных пролетных строения железнодорожных мостов*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.11. Москва.

Васильчук, Л. А. (2020). Выявление развития дефектов по изменению динамических параметров конструкции. *Современные направления в проектировании, строительстве, ремонте и содержании транспортных сооружений*. Минск: изд-во БНТУ, 392-394.

Глушков, С. П., Соловьев, Л. Ю. & Донец, Н. А. (2011). Идентификация повреждений в мостовых конструкциях на основе анализа их колебательных процессов. *Вестник ТГАСУ*, 4, 209-220.

Слюсарь, А. В. & Яшнов А. Н. (2004). Совершенствование методики диагностики железобетонных пролетных строений по результатам исследования их динамической работы. *Научные труды Общества железобетонщиков Сибири и Урала*. Новосибирск: НГАСУ, 8, 83-85.

Цветков, Д. Н. (2008). Исследование динамического отклика сталежелезобетонных пролетных строений с различными повреждениями в плите. *Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: Сб. докладов VII Международ. конф. по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте*. СПб: ПГУПС, 192-193.

© Л. А. Васильчук, А. Н. Яшнов О. Л., 2020

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Чаплин, И. В. (2016). Мониторинг напряженно-деформированного состояния железобетонных преднапряженных пролетных строений железнодорожных мостов. *Научные труды общества железобетонщиков Сибири и Урала*, 64-69.

Яшнов, А. Н. & Снежков, И. И. (2019). Опыт диагностики искусственных сооружений методом малых воздействий. *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*, 3.

Л. О. ВАСИЛЬЧУК^{1*}, А. М. ЯШНОВ²

^{1*} Сібірський мостів, відділ Діагностики та моніторингу мостів, Сибірський державний університет шляхів сполучення, вул. Дусі Ковальчук, 191/3, Новосибірськ, Росія, 630049, тел. +7 (913) 205 29 54, ел. пошта vasilchuck97@mail.ru, ORCID 0000-0001-6332-4211

² Кафедра «Мости», Сибірський державний університет шляхів сполучення, вул. Дусі Ковальчук, 191, Новосибірськ, Росія, 630049, тел. +7 (903) 901 64 01, ел. пошта yan@stu.ru, ORCID 0000-0001-7435-3376

ДІАГНОСТИКА ПІДМИВУ ОПОР МОСТІВ ЗГІДНО ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Мета. З метою обґрунтування можливості своєчасного виявлення підмивів опор шляхом фіксації і аналізу змін динамічних параметрів конструкцій авторами були виконані розрахункові і експериментальні дослідження залежності власних частот коливань опор від умов взаємодії з ґрунтовою основою. **Методика.** Для досягнення поставленої мети було проаналізовано досвід проведення моніторингу технічного стану конструкцій, в тому числі і за динамічними параметрами. Визначено динамічні характеристики опор, які можуть служити індикатором для виявлення підмивів. Проведено чисельні і натурні експерименти для виявлення залежності динамічних параметрів опори від ступеня розвитку місцевого розмиву. **Результати.** Виділено параметр – це частота вільних коливань, який схильний до істотних змін при зміні умов взаємодії опори з ґрунтовою основою. За результатами розрахунків виявлені залежності власної частоти коливань від ступеня підмиву для опор на пальовому фундаменті і на фундаменті мілкого закладення. Дослідним шляхом доведено можливість виявлення розвитку підмиву опори по частоті вільних коливань за допомогою датчиків-акселерометрів вимірювальної системи «Тензор МС». Також на підставі розрахунків визначено, що по змінах частот коливань опори можна визначити не тільки наявність підмиву, але і його місце розташування. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано метод виявлення підмивів опор згідно динамічних параметрів. **Практична значимість.** Впровадження безперервного автоматизованого вимірювання динамічних параметрів опор дозволить своєчасно визначати розвиток підмивів і вживати заходів щодо їх усунення або запобігання подальшого розвитку, що сприятиме недопущенню виникнення несподіваних аварійних ситуацій.

Ключові слова: підмив опори; безперервний автоматизований моніторинг; динамічні параметри; частота вільних коливань; вимірювальна система «Тензор МС»; датчик-акселерометр

Л. А. VASILCHUK^{1*}, А. Н. YASHNOV²

^{1*} Department of Diagnostics and Monitoring of Bridges of Siberian Research Institute of Bridges, Siberian State Transport University, Dusi Kovalchuk Str., 191/3, Novosibirsk, Russia, 630049, tel. +7 913 205 29 54, email vasilchuck97@mail.ru, ORCID 0000-0001-6332-4211

² Department "Bridges" of Siberian State Transport University, Dusi Kovalchuk Str., 191, Novosibirsk, Russia, 630049, tel. +7 903 901 64 01, email yan@stu.ru, ORCID 0000-0001-7435-3376

DIAGNOSTICS OF BRIDGE SCOUR BY DYNAMIC PARAMETERS

Purpose. In order to substantiate the possibility of timely detection of bridge scour by fixing and analyzing changes in the dynamic parameters of structures, the authors carried out computational and experimental studies of the dependence of the natural frequencies of the pier on the conditions of interaction with the soil foundation. **Methodology.** To achieve this goal, the experience of monitoring the technical condition of structures was analyzed, including by dynamic parameters. The dynamic characteristics of the supports have been determined, which can serve as an indicator for identifying bridge scour. Numerical and full-scale experiments were carried out to reveal the dependence of the dynamic parameters of the support on the degree of development of local scour. **Results.** The

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

parameter is highlighted – the natural frequencies, which is subject to significant changes when the conditions of interaction between the pier and the soil foundation. Based on the results of calculations, the dependences of the natural frequencies on the degree of scour on a pile foundation and on a shallow foundation were revealed. The possibility of detecting the development of bridge scour by the natural frequencies using the sensors-accelerometers of the «Tensor MS» measuring system has been experimentally confirmed. Also, on the basis of calculations, it was determined that by changes in the natural frequencies of the pier, it is possible to determine not only the presence of bridge scour, but also its location. **Originality.** For the first time, a method is proposed for detecting bridge scour by dynamic parameters. **Practical value.** The introduction of continuous automated measurement of the dynamic parameters of piers will allow timely determining the development of bridge scour and taking measures to eliminate them or prevent further development, which will help to prevent the occurrence of unexpected emergencies.

Keywords: bridge scour; continuous automated monitoring; dynamic parameters; natural frequencies; measuring system “Tensor MS”; sensors-accelerometers

REFERENCES

- Larocca, A. P. C., Schaal, R. E., & Santos, M. C. (2005). Monitoring of dynamic behavior of suspension bridge on high-frequency GPS-data. *GPS World*. (in English)
- Yashnov, A. & Chaplin, I. (2018). *Specifics of determining the tension forces of the cable-stayed bridge elements*, Siberian Transport Forum – TransSiberia, MATEC Web of Conferences, vol. 239, 05011. (in English)
- Yashnov, A. & Kuzmenkov P. (2018). *Innovative aspects in developing bridge monitoring systems*, X International Scientific and Technical Conference “Polytransport Systems”. MATEC Web of Conferences, vol. 216, 01009. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601009> (in English)
- Bokarev, S. A., Mochalkin, P. S., Snezhkov, I. I. & Yashnov, A. N. (2004). Perspektivy primeneniya karmannykh kompyuterov pri stroitelstve i ekspluatatsii. *Vestnik mostostroeniya*, 3(4), 37-39. (in Russian)
- Bokarev, S. A., Snezhkov, I. I. & Yashnov, A. N. (2007). Malogabaritnye avtomatizirovannye sistemy dlya diagnostiki ISSO. *Put i putevoe khozyaystvo*, 9, 25. (in Russian)
- Bokarev, S. A. & Tsvetkov, D. N. (2010). Ekspress-otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh stale-zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy zheleznodorozhnykh mostov po dinamicheskim parametram. *Izvestiya Transsiba*, 1, 98-99. (in Russian)
- Bondar, I. S. (2019). Vibrodiagnostika balochnykh proletnykh stroeniya zheleznodorozhnykh mostov. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.23.11. Moskva (in Russian)
- Vasilchuk, L. A. (2020). Vyyavlenie razvitiya defektov po izmeneniyu dinamicheskikh parametrov konstrukttsii. *Sovremennye napravleniya v proektirovanii, stroitelstve, remonte i soderzhanii transportnykh sooruzheniy*. Minsk: izd-vo BNTU, 392-394. (in Russian)
- Glushkov, S. P., Solovev, L. Yu. & Donets, N. A. (2011). Identifikatsiya povrezhdeniy v mostovykh konstrukttsiyakh na osnove analiza ikh kolebatelnykh protsessov. *Vestnik TGASU*, 4, 209-220. (in Russian)
- Slyusar, A. V. & Yashnov A. N. (2004). Sovershenstvovanie metodiki diagnostiki zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy po rezultatam issledovaniya ikh dinamicheskoy raboty. *Nauchnye trudy Obshchestva zhelezobetonshchikov Sibiri i Urala*. Novosibirsk: NGASU, 8, 83-85. (in Russian)
- Tsvetkov, D. N. (2008). Issledovanie dinamicheskogo otklika stalezhelezobetonnykh proletnykh stroeniy s razlichnymi povrezhdeniyami v plite. *Problemy prochnosti materialov i sooruzheniy na transporte: Sb. dokladov VII Mezhdunar. konf. po problemam prochnosti materialov i sooruzheniy na transporte*. SPb: PGUPS, 192-193. (in Russian)
- Chaplin, I. V. (2016). Monitoring napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh prednapryazhennykh proletnykh stroeniy zheleznodorozhnykh mostov. *Nauchnye trudy obshchestva zhelezobetonshchikov Sibiri i Urala*, 64-69. (in Russian)
- Yashnov, A. N. & Snezhkov, I. I. (2019). Opyt diagnostiki iskusstvennykh sooruzheniy metodom malyykh vozdeystviy. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya»*, 3. (in Russian)

Надійшла до редколегії 27.08.2020.

Прийнята до друку 17.09.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.159.4:624.131.5-047.36

Ю. Л. ВИННИКОВ^{1*}, С. М. МАНЖАЛІЙ^{2*}

^{1*} Кафедра «Нафтогазової інженерії та технологій», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Першотравневий пр., 24, Полтава, Україна, 36011, тел. +38 (067) 256 42 86, ел. пошта vupnykov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2164-9936

² ТОВ «Свротехкомплект», пр. Героїв Дніпра, 89, Горішні Плавні, Полтавська область, Україна, 39800, тел. +38 (067) 530 76 01, ел. пошта msn1975@i.ua, ORCID 0000-0002-5819-6056

УДОСКОНАЛЕННЯ ГЕОТЕХНІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ПІДСИЛЕННЯ ДЕФОРМОВАНОЇ БУДІВЛІ НА ПАЛЬОВОМУ ФУНДАМЕНТІ

Мета. Удосконалити геотехнічний моніторинг системи «деформована будівля – забивні призматичні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром» до, в процесі та після підведення під існуючі ростверки монолітної залізобетонної плити. **Методика.** Стандартні польові та лабораторні методи визначення фізико-механічних властивостей ґрунтів; нормативні методи обстеження технічного стану несучих будівельних конструкцій, їх основ і фундаментів; методи математичної статистики для обробки результатів експериментів; тривалі геодезичні спостереження за деформаціями цегляної будівлі на пальовому фундаменті до та після його посилення. **Результати.** На характерному натурному об'єкті розроблено та апробовано систему геотехнічного моніторингу і науково-технічного супроводу системи «деформована будівля – забивні призматичні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром» до та після підведення під існуючі ростверки монолітної залізобетонної плити: визначено фактичні параметри її основ і фундаментів та їх зміни в часі; проведено геодезичні спостереження за деформаціями об'єкту до, в процесі й після його посилення для встановлення закономірностей розвитку та стабілізації цих деформацій у часі й ін. **Наукова новизна.** Удосконалено конструктивно-технологічне рішення посилення фундаментів із забивних призматичних паль у складі стрічкового ростверку шляхом підведення під існуючі ростверки монолітної залізобетонної плити та отримано нові дослідні дані про зміну напружено-деформованого стану системи «деформована будівля – забивні призматичні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром» внаслідок підведення під існуючі ростверки плити. **Практична значимість.** Розроблено та впроваджено в геотехнічну практику конструктивно-технологічне рішення посилення фундаментів із забивних призматичних паль у складі стрічкового ростверку шляхом підведення під існуючі ростверки монолітної залізобетонної плити та відповідну методику геомоніторингу.

Ключові слова: пісок; слабкий ґрунт; забивна призматична паля; залізобетонний ростверк; осідання; тріщина; технічний стан будівлі; геотехнічний моніторинг; монолітна залізобетонна плита

Вступ

До групи деформованих споруд відносять будівлі, що отримали за період їх будівництва й особливо експлуатації недопустимі осідання та деформації, які, однак, не заважають виконанню їх основних функцій, але обмежують можливість їх своєчасного посилення (Коновалов, П. О. & Коновалов, В. П., 2010). Їх причинами є помилки при інженерно-геологічних вишукуваннях; неякісне проектування; порушення правил будівельних робіт; порушення правил експлуатації будівель і споруд.

Тривалі геодезичні спостереження за осіданнями будівель і споруд, у т. ч. на пальових

фундаментах (EN 1990:2002/A1:2005/AC, 2010; ДБН В.2.1-10:2018; Мангушев, & Нікіфорова, 2017; Полішук, 2004; Briaud, 2013; Zotsenko, & Vinnikov), показали, що:

- їх нерівномірність переважно виникає ще під час будівництва; при цьому, чим більше абсолютне осідання основи, тим більша й відносна нерівномірність осідань, крен і т. ін.;

- фактичні осідання найчастіше складають близько 30 % від розрахованих і рідше до 80 %, але у слабких водонасичених ґрунтах стабілізовані осідання часто перевищують не лише розраховані величини, але й граничні нормативні значення; до того ж за таких умов,

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

чим швидше зводиться споруда, тим більші деформації;

- величини осідань основ від навантажень і час їх стабілізації залежать від виду та стану ґрунтів, інтенсивності передачі тиску на основу; деформації пісків і твердих глинистих ґрунтів практично стабілізується в перший же рік після здачі об'єкта в експлуатацію, а деформації текучих глинистих ґрунтів тривають десятиріччями, тому для цих основ достатньо коректно приймати частку осідання за період зведення споруди за 50 % від стабілізованого осідання;

- осідання в будівельний період викликаються зростанням тиску на ґрунт; при цьому зі збільшенням його інтенсивності відсоток осідання від кінцевого значення деформації зменшується (щоправда, останнє узагальнення не завжди виконується для слабких ґрунтів).

Такі інформативні дослідження досить рідкі, і зазвичай починаються вже після отримання будинками та спорудами помітних деформацій і тріщин. Тому для успішності реконструкції будівель, у т. ч. з посиленням їх основ і фундаментів, обов'язково слід виконувати геотехнічний моніторинг (геомоніторинг) – «система спостережень і контролю з використанням інструментальних вимірювань, яка виконується за спеціальною програмою з метою виявлення напружено-деформованого стану (НДС) основ фундаментів і несучих конструкцій існуючих будівель» (Коновалов, П. О. & Коновалов, В. П., 2010; Іллічов, & Мангушев, 2014; Vynnykov, & Manzhaliy, 2019).

Після виникнення та розкриття тріщин у несучих конструкціях слід виконувати комплекс досліджень для виявлення причин появи і розвитку деформацій у конструкціях будівлі. Об'єм і склад робіт з геотехнічного моніторингу залежить від складності об'єкту й визначається відповідною програмою робіт (Іллічов, & Мангушев, 2014; Katzenbach, Leppla, Seip, & Kurze, 2015).

Програма включає в себе предмет моніторингу (за якими об'єктами та якими методами ведуть спостереження), періодичність і терміни спостережень, форма представлення матеріалів моніторингу, можливі заходи за несприятливих впливів (Іллічов, & Мангушев, 2014). Зазвичай, у зону дії моніторингу попадають об'єкти на відстані до 30 м.

Серед основних методів моніторингу (Коновалов, П. О. & Коновалов, В. П., 2010) доцільно виділити:

- спостереження за розкриттям тріщин в існуючих будівлях;

- спостереження за вертикальними та горизонтальними деформаціями існуючих будівель;

- визначення змін НДС у ґрунтовому масиві та конструкціях будівель і споруд;

- контроль за зміною рівня підземних вод;

- контроль за якістю улаштування паль;

- контроль за якістю зведення монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій (зокрема, й ростверків);

- контроль за якістю земляних робіт (технології відкопування котловану та кріплення його стінок, водозниження, улаштування штучних основ, зворотної засипки та ін.);

- технічний контроль за станом конструкцій, що зводяться, тощо.

Геомоніторинг звичайно поділяють на три етапи (Іллічов, & Мангушев, 2014):

- підготовчий (планування зони моніторингу (будівлі, конструкції, що підлягають до постійних спостережень), встановлення обладнання для регулярних спостережень, маячків і датчиків на тріщинах (з датою), створення геодезичної мережі (репери, стінові марки) (EN 1990:2002/A1:2005/AC, 2010; ДБН В.2.1-10:2018), знімання «нульових» відліків тощо);

- робочий (період регулярних спостережень за об'єктами (геодезичні спостереження, зняття показників датчиків), оцінювання якості будівельних робіт і коригування конструктивно-технологічних заходів);

- післябудівельний (продовження спостережень за об'єктами (будівлями, конструкціями), що отримали найбільш небезпечні деформації;

- тривалість етапу залежить від стану об'єктів моніторингу та його мети, але не менше року).

Відзначимо також, що результати оцінювання технічного стану будівель і споруд (несучих будівельних конструкцій, їх основ і фундаментів) на базі їх обстеження і перевірок

розрахунків суттєво впливають на вибір оптимального конструктивно-технологічного рішення посилення конструкцій та фундаментів деформованих будівель шляхом призначення граничних величин додаткових осідань та їх нерівномірності при реконструкції (посиленні) кожного конкретного об'єкту.

Щодо особливостей геомоніторингу саме об'єктів з системою «деформована будівля – забивні призматичні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром», то одним з його найбільш вразливих місць є складність достовірного визначення параметрів основ і фундаментів, зокрема, фактичної довжини паль, а для проведення подальших перевірочних розрахунків – складність складання розрахункової схеми системи «деформована будівля – забивні призматичні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром» до та після реконструкції (підсилення) для достовірного оцінювання особливостей спільної роботи складових цієї системи.

Ряд прикладів геотехнічного моніторингу за посиленням (реконструкцією) деформованих будівель і споруд (Коновалов, П. О. & Коновалов, В. П., 2010; Поліщук, 2004; Зоценко, & Винников, 2019; Тугаєнко, Марченко, Ткаліч, & Логінова, 2018; Уліцький, Шашкін, & Шашкін, 2010) демонструє широкі можливості використання даних спостережень та вимірів за керуванням безпечного проведення робіт і якістю (надійністю) їх практичних результатів.

Тому є сенс удосконалювати не просто геомоніторинг (як пасивний збір технічних даних спостережень і вимірів у процесі реконструкції), а науково-технічний супровід (Іллічов, & Мангушев, 2014; Уліцький, Шашкін, О. Г. & Шашкін, К. Г., 2010; Винников, Кічаєва & Суходуб). Останній передбачає обробку й активне використання отриманої за час геомоніторингу інформації при прийнятті оперативних рішень, які сприяють безпечному та якісному веденню робіт (ДБН В.2.1-10:2018; Іллічов, & Мангушев, 2014).

Отже, у практиці реконструкції будівель, у т. ч. посиленні їх основ і фундаментів, маємо

певну загальну систему геомоніторингу й науково-технічного супроводу, закріплену нормами, але для об'єктів з системою «деформована будівля – забивні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром» одним з найбільш вразливих місць є складність достовірного визначення параметрів основ і фундаментів, зокрема, фактичної довжини паль, а для подальших розрахунків – складність складання розрахункової схеми цієї системи до та після підсилення для достовірного оцінювання особливостей спільної роботи її складових.

Мета

На характерному натурному об'єкті розробити та апробувати систему геотехнічного моніторингу і науково-технічного супроводу системи «деформована будівля – забивні призматичні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром» до, в процесі та після підведення під існуючі ростверки монолітної залізобетонної плити: визначити фактичні параметри її основ і фундаментів та їх зміни в часі; провести геодезичні спостереження за деформаціями об'єкту до й після його посилення для встановлення закономірностей розвитку та стабілізації цих деформацій у часі й ін.

Методика

Відповідно до мети на характерному натурному об'єкті (деформований п'ятиповерховий трьохсекційний цегляний житловий будинок) розроблено й апробовано систему геотехнічного моніторингу та науково-технічного супроводу системи «деформована будівля – забивні призматичні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром» до, в процесі та після підведення під існуючі ростверки залізобетонної плити.

Алгоритм досліджень геотехнічного моніторингу та науково-технічного супроводу при підсиленні деформованої будівлі на пальному фундаменті включав три послідовні етапи:

1) підготовчий:

– рекогносцировка майбутнього об'єкту

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

геомоніторингу;

- збір і аналіз наявної вишукувальної, проектної, виконавчої та іншої технічної документації, що має відношення до об'єкту;

- візуальне й інструментальне обстеження несучих будівельних конструкцій, фіксація та заміри видимих деформацій, тріщин і т. ін.;

- обміри в обсязі, необхідному для перевірочних розрахунків цих конструкцій;

- проведення додаткових інженерно-геологічних і гідро-геологічних досліджень;

- визначення параметрів основ і фундаментів, у т. ч. фактичної довжини паль (акустичним методом), а за необхідності їх фактичної несучої здатності (шляхом тимчасового вирубування паль зі складу ростверку та наступних статичних випробувань цими палями ґрунту, за даними статичного зондування ґрунтів, за результатами додаткових інженерно-геологічних досліджень), фактичних параметрів ростверків, тощо;

- встановлення для регулярних спостережень маячків на існуючих тріщинах (з вказуванням дати їх улаштування), встановлення на несучих будівельних конструкціях датчиків (наприклад, так званих креномірів), створення чи використання існуючої на період моніторингу геодезичної мережі (ґрунтовий репер, стінові осадочні марки на рівні цоколя будівлі), знімання «нульових» відліків і т. ін.).

Складова науково-технічного супроводу на цьому етапі геомоніторингу включає в себе наступні дослідження:

- вертикальна прив'язка паль і ростверків до інженерно-геологічного розрізу (іноді інженерно-геологічної колонки);

- перевірочні (аналітичні чи моделюванням методом скінчених елементів (МСЕ)) розрахунки несучих конструкцій, їх основ, паль, пальових фундаментів;

- оцінювання технічного стану несучих будівельних конструкцій, їх основ і фундаментів на базі результатів їх обстеження та перевірочних розрахунків;

- побудова розрахункової схеми системи «деформована будівля – забивні призматичні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром» до її посилення та моделювання з використанням МСЕ та пружно-пластичної моделі ґрунту НДС

цієї системи для оцінювання особливостей спільної роботи її складових;

- встановлення причин наднормових деформацій основ фундаментів будівлі;

- розроблення рекомендацій щодо подальшої експлуатації будівлі та вибір можливих конструктивно-технологічних рішень посилення її пальових фундаментів чи їх основ;

- побудова розрахункової схеми системи «деформована будівля – забивні призматичні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром» після її посилення та відповідне моделювання МСЕ НДС цієї системи для оцінювання особливостей спільної роботи її складових;

- обґрунтування оптимального конструктивно-технологічного рішення посилення пальових фундаментів будівлі чи їх основ;

2) робочий:

- регулярні спостереження за станом маячків на існуючих тріщинах, зняття показників датчиків на несучих конструкціях, нівелювання стінових осадочних марок, графічне та табличне відображення результатів регулярних спостережень у відповідному журналі;

- оцінювання якості робіт з підсилення пальових фундаментів.

Складова науково-технічного супроводу на цьому етапі геомоніторингу включає в себе наступні дослідження:

- аналіз результатів регулярних спостережень за деформаціями будівлі;

- коригування конструктивно-технологічних заходів;

3) післябудівельний:

- продовження регулярних спостережень за об'єктом (тривалість цього етапу залежить від його технічного стану, але не менше 1 року).

Складова науково-технічного супроводу на цьому етапі геомоніторингу включає в себе наступні дослідження:

- аналіз результатів регулярних спостережень за деформаціями будівлі, прогнозування часу їх умовної стабілізації та відповідних кінцевих величин деформацій тощо.

Результати

Характерний натурний об'єкт дійсних досліджень, посилення якого було здійснено без

відселення його мешканців на цей період, – це п'ятиповерховий житловий будинок з підвалом і технічним поверхом, який знаходиться по вул. Героїв Дніпра, 27 у м. Горішні Плавні Полтавської області.

Його зведено в 1977 р. за типовим проектом. Він складається з трьох блок-секцій: 87-049/71 – торцева ліва, що зазнала значних деформацій (рис. 1); 87-046 – рядова; 87-048/71 – торцева права. У конструктивному відношенні будівля являє споруду з повздовжніми несучими стінами. Висота поверхів – 2,8 м, а підвалу (від підлоги до низу перекриття) – 2,1...2,2 м.



Рис. 1. Вигляд торцевої блок-секції деформованої будівлі (в період підготовчого періоду геотехнічного моніторингу)

Стіни будівлі – з повнотілої полуторної силікатної цегли на цементно-піщаному розчині. Товщина зовнішніх повздовжніх несучих і торцевих стін без оздоблення складає 510 мм. Товщина внутрішньої повздовжньої несучої стіни з шаром штукатурки – 400 мм. Несучі стіни в підвалі будинку з позначки -2.800 до -1.600 виконано з 2 рядів блоків ФБС 24.5.6-Т, а вище з

цегляної кладки. Просторова жорсткість забезпечується поперечними стінами сходової клітки і дисками міжповерхових перекриттів. Конструктивну схему будівлі не можна вважати жорсткою. Клас наслідків будівлі – СС-2. Через підвал проходить магістральна теплова мережа. Її вхід до підвалу розташований під лівою блок-секцією (осі 1-2), з боку стіни сходової клітки. Під секцією розташований й поворот мережі на 90°, після чого вона проходить через увесь підвал і виходить з протилежного торця будинку.

При візуальному й інструментальному обстеженні несучих будівельних конструкцій деформованої блок-секції було встановлено, що при зведенні та експлуатації будинку виникли дефекти й пошкодження, що впливають на несучу здатність і довговічність окремих елементів й будівлі в цілому, зокрема:

- вертикальні тріщини із шириною розкриття до 20 мм (рис. 2) по всій висоті зовнішніх і внутрішніх несучих стін переважно в місцях спирання перемичок і над (під) прорізами.

Тріщини характерні для будівель із залізобетонними перемичками, які призводять до деформацій віконного блоку поворотом як єдиного жорсткого елемента. Тріщини свідчать про значні деформації основи фундаментів лівої торцевої секції в напрямку відділення від основної частини будинку.

Розвиток тріщин суттєво знижує просторову жорсткість секції, бо для розділених на частини зовнішніх і внутрішніх стін просторова жорсткість вже не забезпечується поперечними стінами сходової клітки. На зовнішніх і внутрішніх стінах сходової клітки тріщини відсутні, що підтверджує попередні твердження.

Незначні тріщини в стінах і між плитами перекриття виникли одразу після заселення будинку в 1977 р., але найбільших деформацій він зазнав у 1993 р. після прориву теплотраси в куті її повороту на 90° під лівою блок-секцією І-ІІ, в осях І-2. Тоді ж для зменшення деформацій влаштовано попередньо напружені тяжі підсилення (рис. 1) з арматурних стрижнів діаметром 36 мм із талрепами для створення напруження в них. По торцевим стінам встановлено горизонтальні балки прямокутного перерізу з двох зварених швелерів № 24, кріплення тяжів до балок – через рівнополічний кутик 140×10, який встановлено по кутах будинку.

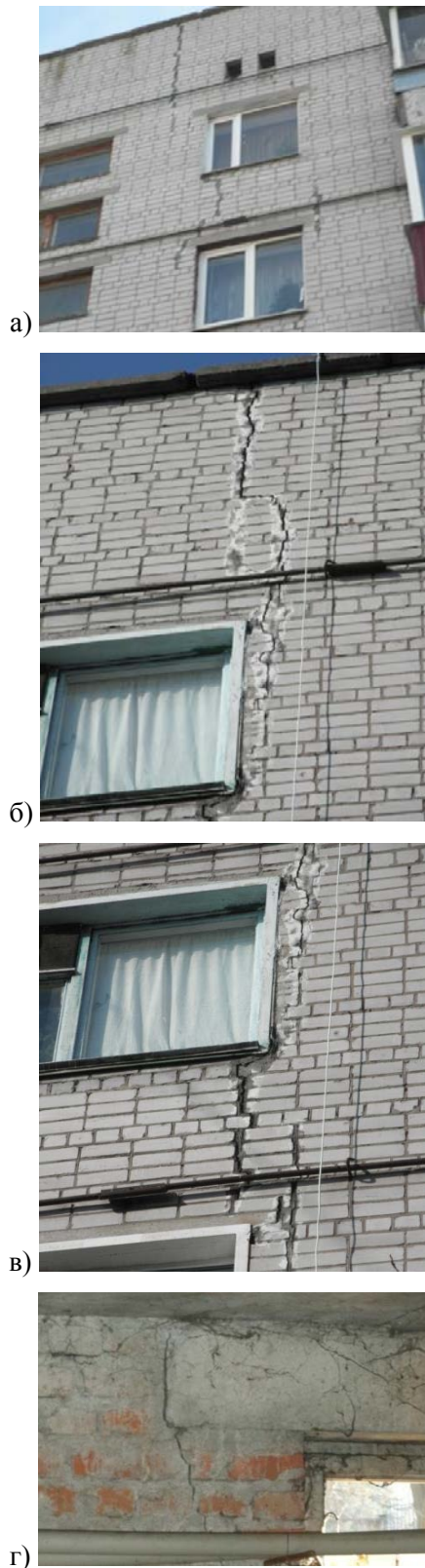


Рис. 2. Вертикальні тріщини з шириною розкриття:
а) 7 мм; б) 15 мм; в) 12 мм; г) 4 мм (у підвалі)

Зважаючи на те що вільна між точками закріплення довжина тяжів не повинна перевищувати 15...20 м (в нашому випадку вона складала 67,2 м), то тріщини розкривались і надалі, бо при значній довжині пружні абсолютні деформації в сталі тяжів дуже значні. У рівні перекриття третього та п'ятого поверхів стався обрив металевого тяжа (рис. 3), що свідчить про невдачу конструкцію підсилення.



Рис. 3. Обрив верхнього металевого тяжа в рівні перекриття п'ятого поверху

На зовнішніх (починаючи з першого поверху) і внутрішніх (починаючи з третього поверху) несучих стінах було влаштовано гіпсові маячки. Тріщини в них свідчать про подальший розвиток деформацій (рис. 4). При цьому на торцевій стіні деформованої блок секції тріщини відсутні. Отже, технічний стан несучих стін класифіковано як незадовільний.



Рис. 4. Тріщина в гіпсових маячках, встановлених на зовнішній і внутрішній несучих стінах

Перекриття – збірні залізобетонні пустотні плити довжиною 5,4 м. У підвалі та на п'ятому поверсі в швах між плитами виникли тріщини, деякі шви незаповнені розчином, що дещо зменшує просторову жорсткість будівлі. Технічний стан перекриттів – задовільний.

На рівні цоколя за периметром деформованої будівлі влаштовано осадочні осадкові марки (рис. 5), за якими надалі велось геометричне нівелювання III класу точності протягом всього періоду геотехнічного моніторингу.



Рис. 5. Осадочні марки на рівні цоколя будівлі

Фундаменти – пальові із забивних призматичних паль СНпр 9-35 (довжина 9 м, переріз 350×350 мм), що об'єднані стрічковим монолітним залізобетонним ростверком висотою 400 мм. Під внутрішню несучу стіну ширина ростверку – 400 мм, зовнішню – 500 мм. Крок паль під внутрішню стіну – 1100 мм, зовнішню – 1360-1530 мм, а під торцеві – 1590...1610 мм.

На ділянці під насипним шаром (ІГЕ-1а) і пісками мілкими намівними (ІГЕ-2с і ІГЕ-2п, відповідно середньої щільності й щільними з модулем деформації відповідно $E = 19,5$ і 35 МПа) загальною потужністю 7 м залягає шар, так званих, похованих ґрунтів (ІГЕ-3) – супіски шаруваті, опіщанені, з прошарками мулів і глин, текучі ($E = 6,5$ МПа, вміст органіки – 8 %), що з глибини 9...10 м підстилаються пісками середньої крупності, щільними (ІГЕ-4, $E = 45$ МПа), а з глибини 18 м – глиною. Намив піску на ділянці проводили в 1970-1973 рр. Рівень ґрунтових вод на момент вишукувань склав 6,8...7,3 м від земної поверхні. Його річні та сезонні коливання – до 1,5 м від цього рівня.

У межах ділянки виявлено несприятливі інженерно-геологічні процеси: динамічний вплив на піщані ґрунти від вибухів на кар'єрі, що може призводити на їх динамічного розрідження; механічна суфозія при експлуатації водонесу-

чих комунікацій; достатньо потужна (до 2,3 м) товща ґрунтів з домішками органічних речовин.

Проект передбачав прорізання товщі похованих ґрунтів палями СНпр 9-35, які заходили в ІГЕ-4. Для цього випадку розрахунком встановлено, що: навантаження на палю під внутрішню та зовнішню несучу стіну відповідно складає 404,5 та 390,6 кН; несуча здатність палі $Fd = 1334,8$ кН; допустиме розрахункове навантаження $N = 953,4$ кН; осідання основи цього фундаменту складає $S = 1,44$ см.

Враховуючи вищесказане і найгірший можливий варіант, за умови якого при пориві теплотраси могло проявитись «негативне тертя» за бічною поверхнею палі, величина котрого може досягти 317 кН (ІГЕ-2с, ІГЕ-2п), допустиме розрахункове навантаження на палю складає $N = 499,5$ кН, що все-одно перевищує навантаження на палю від будинку 404,5 кН.

Тому в межах геомоніторингу перевірено фактичну довжина паль у складі фундаменту. При зондуванні не завжди вдавалося зондом пройти товщу намівних пісків (ІГЕ-2п – щільний). Прорізати ці шари забиванням дизель-молотом паль перерізом 350×350 мм на період будівництва було складно. Контроль суцільності та довжини паль було здійснено акустичним методом за допомогою програмно-технічного комплексу Pile Integrity Tester PIT-W, який має граничну відносну похибку визначення лінійних розмірів конструкцій ± 5 %. Комплекс пройшов метрологічну перевірку в центрі стандартизації, метрології і сертифікації. Прилад базується на методі відбитих імпульсів. Спочатку посилають імпульс, завдаючи легкого удару по поверхні палі. Для цього використовують спеціальний ручний молоток. Акустична хвиля, викликана імпульсом, поширюється вздовж палі. Форма палі та якість її матеріалу впливають на відбиті хвилі, які реєструються по мірі їх повернення на поверхню. Записуються усі поверхневі вібрації для отримання інформації про всі основні відбиті сигнали. Для діагностики цілісності палі аналізують відбиті хвилі з урахуванням їх природи та інтенсивності.

Для цих випробувань пройдено 6 шурфів і в них розчищено тіло палі на 20 см, 3 з них – у лівій пошкодженій блок-секції в осях І-ІІ, 2 – у рядовій блок секції в осях ІІ-ІІІ та 1 – у правій блок-секції в осях ІІІ-ІV (рис. 6). Процес контролю довжини паль наведено на рис. 7.

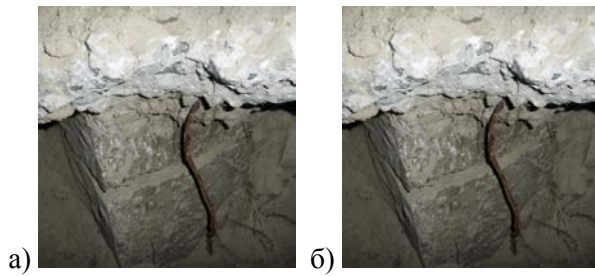


Рис. 6. Вигляд паль у складі ростверку з шурфів:
а) № 1 (палія № 119); б) № 2 (палія № 105)



Рис. 7. Контроль довжини паль

Для підтвердження результатів візуального та інструментального контролю цілісності паль та їх довжини перевірено можливість «зрубання» оголовків паль. Зокрема, порівняно проектне армування оголовку паль з їх фактичним (перші 300 мм оголовку армується сітками з кроком 50 мм, а потім починається спіраль довжиною 700 мм з кроком поперечної арматури 100 мм, яка переходить у спіраль з кроком поперечної арматури 200 мм). Захисний шар бетону попередньо видалено. При дослідженні армування паль шурф збільшено в глибину, в результаті чого в стовбурі знайдено тріщини. Захисний шар бетону відколото в розтягнутій зоні, фактично паля зруйнована. Бетон в стиснутій зоні сколювався і кришився. Крок поперечної арматури – 200 мм. Це підтверджує, що палю не занурено на проектну позначку, її було «зрубано». Мінімальна довжина «зрубаної» частини – 600 мм. У такому стані паля не сприймає вертикальних стискуючих навантажень. Фактична довжина паль склала 4,5...8,5 м. Перевірка армування паль підтвердило, що частину паль не вдалося занурити на проектну позначку. Тому виконано розрахунок палі № 119 (шурф № 1) довжиною 4,5 м. Її прив'язка до інженерно-геологічної колонки подана на рис. 8.

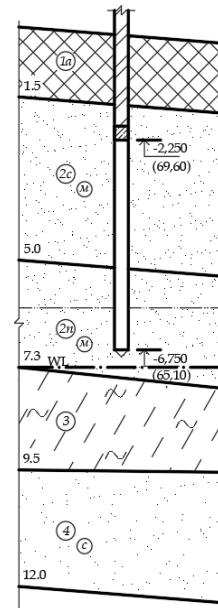


Рис. 8. Вертикальна прив'язка палі СНпр 4,5-35 до інженерно-геологічної колонки

Осідання палі склало $S = 2.2 - 2.5$ см залежно. Отже, різниця між осіданням паль довжиною 9 м і 4,5 м складає близько 1 см, що не могло викликати фактичних понаднормових деформацій. Але враховуючи виникнення ефекту «негативного тертя» через самоущільнення та механічну суфозію у верхніх шарах намівних пісків після пориву магістральної теплотраси, які підсилювались інерційними силами від вибухів у кар'єрі, несуча здатність палі знизилась аж до $F_d = 375.7$ кН, а розрахункове навантаження на неї – до $N = 268.0$ кН, що менше зусилля від будівлі 404,5 кН. При перевищенні допустимого навантаження на палю осідання основи пального фундаменту відбувалися вже у нелінійній стадії, які й призвели до появи й розвитку існуючих деформацій будівлі. Якщо б усі палі вістрям досягли проектної позначки, то, звичайно, такі деформації не виникли б.

Технічний стан палових фундаментів класифіковано як незадовільний. Тому вирішено розробити проект посилення цих фундаментів.

Посилення полягало в підведенні під ростверки монолітних залізобетонних балок L-подібного обрису, які об'єднували поперечними залізобетонними балками, а зверху – монолітною плитою товщиною 200 мм (рис. 9). Щоб включити плиту «в роботу» зразу після її влаштування передбачено ущільнення основи під

плитою щебнем і трамбування її віброплитами. Роботи виконано за шість етапів:

1) відривання траншей і бетонування поперечних балок жорсткості між ростверками повздовжніх несучих стін та під ростверками поперечних стін сходових кліток;

2) підведення L-подібних балок під ростверки на перетині повздовжніх і поперечних стін між осями «2» та «1»;

3) L-подібні балки, котрі залишилися, підводилися під ростверки на перетині повздовжніх і поперечних стін між осями «2» та «1»;

4) підведення L-подібних балок під ростверки на перетині повздовжніх і поперечних стін між осями «І» та «2»;

5) підведення L-подібних балок у проміжки, які залишилися під ростверками на перетині повздовжніх і поперечних стін (в осях «І» і «2»);

6) армування та бетонування верхньої монолітної плити, що об'єднає всі балки посилення у суцільну жорстку просторову конструкцію.

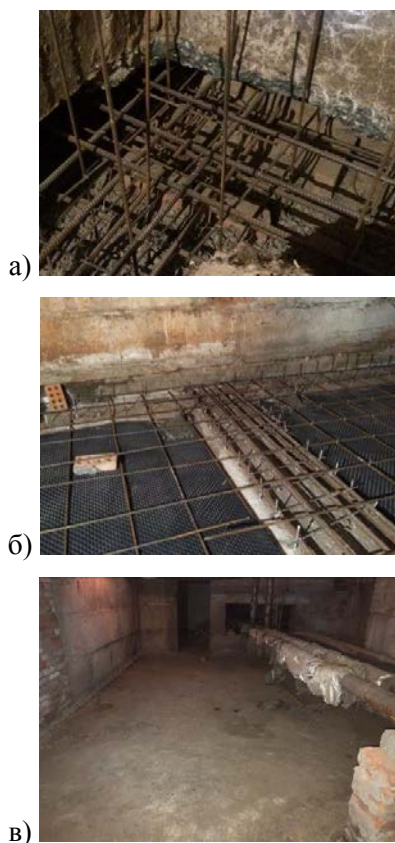


Рис. 9. Процес посилення фундаментів будівлі:
а – улаштування монолітних залізобетонних балок посилення; б – улаштування плити посилення; в – сучасний вигляд підвалу після завершення робіт

Отримано ребристу плиту підсилення, основою якої є ПЕ-2с (пісок намивний, мілкий, середньої щільності). Її ребра спрямовані до низу. Ця конструкція добре перерозподіляє напруження від нерівномірних деформацій основ і має значну жорсткість за мінімального об'єму земляних робіт, тобто в процесі фактично влаштовано плитно-пальовий фундамент.

У межах реалізації проекту також розширили й зачеканили тріщини; усунули розгерметизацію теплової мережі; замінили трубопроводи магістральної теплової мережі; посилено залізобетонні перемички в несучій внутрішній стіні підвалу; відновили захисний шар бетону паль, в яких досліджувалось армування; відновили вимощення за периметром будинку і т. ін.

У результаті геотехнічного моніторингу в післябудівельний період (після підсилення його фундаментів) описаного об'єкту, який триває вже понад 3,5 роки, встановлено, що:

- додаткові осідання основи фундаменту будівлі не перевищили 1...2 мм і вже стабілізувались;

- після завершення посилення частина раніше зруйнованих гіпсових маячків була відновлена, однак нові тріщини в них не утворились (рис. 10).



Рис. 10. Гіпсові маячки, відновлені на зовнішніх несучих стінах після посилення пальових фундаментів будівлі (нові тріщини в них не утворились)

Отже, удосконалено методику геотехнічного моніторингу системи «деформована споруда – палі у складі стрічкового ростверку – основа зі слабким підстильним шаром» до та після підведення під ростверку плити: визначено фактичні параметри основ і фундаментів, їх зміни в часі; проведено спостереження за деформаціями об'єкту до й після посилення. Його результати довели достатньо високу ефективність і надійність конструктивно-технологічного рішення посилення фундаментів із забивних призматичних паль у складі стрічкового ростверку шляхом підведення під існуючі ростверки монолітної залізобетонної плити.

Наукова новизна та практична значимість

За результатами роботи удосконалено конструктивно-технологічне рішення посилення фундаментів із забивних призматичних паль у складі стрічкового ростверку шляхом підведення під існуючі ростверки монолітної залізобетонної плити та отримано нові дослідні дані про зміну напружено-деформованого стану системи «деформована будівля – забивні призматичні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром» внаслідок підведення під існуючі ростверки плити. Розроблене рішення впроваджено в геотехнічну практику разом із відповідною методикою геомоніторингу.

Висновки

Таким чином, на характерному натурному об'єкті удосконалено й апробовано систему геотехнічного моніторингу системи «деформована будівля – забивні призматичні палі у складі стрічкового ростверку – ґрунтова основа зі слабким підстильним шаром» до та після підведення під існуючі ростверки монолітної залізобетонної плити: визначено фактичні параметри її основ і фундаментів та їх зміни в часі; проведено спостереження за деформаціями об'єкту до й після його посилення для встановлення закономірностей розвитку та стабілізації цих деформацій у часі й ін.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Briaud, J.-L. (2013). *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*. Wiley.
EN 1990:2002/A1:2005/AC. (2010). *Eurocode: Basis of*

Structural Design. Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC.

Katzenbach, R. Leppla, S. Seip, M. & Kurze, S. (2015) Value Engineering as a basis for safe, optimized and sustainable design of geotechnical structures. *Proc. of the XVI European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. Edinburgh. 601-606.

Vynnykov, Yu. & Manzhaliy, S. (2019) Residential building's deformation on pile foundation. *Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. Poltava: Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. 2(53), 98-106.

Zotsenko, N. L. & Vinnikov, Y. L. (2016) Long-Term Settlement of Buildings Erected on Driven Cast-In-Situ Piles in Loess Soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 53(3), 189-195.

Винников, Ю. Л., Кичаева, О. В. & Суходуб, А. В. (2014). Оценка совместной работы системы «основание – фундамент – сооружение» при надстройке. *Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение: материалы междунар. науч.-техн. конф.* Санкт-Петербург: СПбГАСУ, I, 130-136.

ДБН В.2.1-10:2018. *Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення*. Київ: Мінрегіонбуд України.

Зоценко, М. Л. & Винников, Ю. Л. (2019) *Фундаменти, що споруджуються без виймання ґрунту*. Полтава: ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка.

Ильичев В. А. & Мангушев, Р. А. (2014). *Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения*. Москва: Изд-во АСВ.

Коновалов, П. А. & Коновалов, В. П. (2011). *Основания и фундаменты реконструируемых зданий*. Москва: Изд-во АСВ.

Мангушев, Р. А. & Никифорова, Н. С. (2017). *Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства*. Москва: Изд-во АСВ.

Полищук, А. И. (2004). *Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий*. Нортхэмптон: STT; Томск: STTY.

Тукаєнко, Ю. Ф., Марченко, М. В. Ткаліч, А. П. & Логінова, Л. О. (2018). *Природа деформування ґрунтів*. Одеса: Астропринт.

Улицкий, В. М., Шашкин, А. Г. & Шашкин, К. Г. (2010). *Геотехническое сопровождение развития городов*. Санкт-Петербург: «Геореконструкция».

Ю. Л. ВИННИКОВ^{1*}, С. Н. МАНЖАЛІЙ²

^{1*} Кафедра «Нефтегазовой инженерии и технологий», Национальный университет «Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка», Первомайский пр., 24, Полтава, Украина, 36011, тел. +38 (067) 256 42 86, эл. почта vynnykov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2164-9936

² ООО «Евротехкомплект», пр. Героев Днепра, 89, Горишние Плавни, Полтавская область, Украина, 39800, тел. +38 (067) 530 76 01, эл. почта msn1975@i.ua, ORCID 0000-0002-5819-6056

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА УСИЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО ЗДАНИЯ НА СВАЙНОМ ФУНДАМЕНТЕ

Цель. Усовершенствовать геотехнический мониторинг системы «деформированное здание – забивные призматические сваи в составе ленточного ростверка – грунтовая основа со слабым подстилающим слоем» до, в процессе и после подведения под существующие ростверки монолитной железобетонной плиты. **Методика.** Стандартные полевые и лабораторные методы определения физико-механических свойств грунтов; нормативные методы обследования технического состояния несущих строительных конструкций, их оснований и фундаментов; методы математической статистики для обработки результатов экспериментов; длительные геодезические наблюдения за деформациями кирпичного здания на свайном фундаменте до и после его усиления. **Результаты.** На характерном натурном объекте разработана и апробирована система геотехнического мониторинга и научно-технического сопровождения системы «деформированное здание – забивные призматические сваи в составе ленточного ростверка – грунтовая основа со слабым подстилающим слоем» до и после подведения под существующие ростверки монолитной железобетонной плиты: определены фактические параметры ее оснований и фундаментов и их изменения во времени; проведено геодезические наблюдения за деформациями объекта до, в процессе и после его усиления для установления закономерностей развития и стабилизации этих деформаций во времени и др. **Научная новизна.** Усовершенствовано конструктивно-технологическое решение усиления фундаментов из забивных призматических свай в составе ленточного ростверка путем подведения под существующие ростверки монолитной железобетонной плиты и получены новые опытные данные об изменении напряженно-деформированного состояния системы «деформированное здание – забивные призматические сваи в составе ленточного ростверка – грунтовое основание со слабым подстилающим слоем» вследствие подведения под существующие ростверки плиты. **Практическая значимость.** Разработаны и внедрены в геотехническую практику конструктивно-технологическое решение усиление фундаментов из забивных призматических свай в составе ленточного ростверка путем подведения под существующие ростверки монолитной железобетонной плиты и соответствующая методика геомониторинга.

Ключевые слова: песок; слабый грунт; забивная призматическая свая; железобетонный ростверк; осадка; трещина; техническое состояние здания; геотехнический мониторинг; монолитная железобетонная плита

YU. L. VYNNYKOV^{1*}, S. M. MANZHALII^{2*}

^{1*} Department of Oil and Gas Production and Geotechnics, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Pervomaysky av., 24, Poltava, Ukraine, 36011, tel. +38 (067) 256 42 86, e-mail vynnykov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2164-9936

² LLC “Eurotechkomplekt”, av. Heroes of the Dnieper, 89, Gorishni Plavni, Poltava region, Ukraine, 39800, tel. +38 (067) 530 76 01, e-mail msn1975@i.ua, ORCID 0000-0002-5819-6056

IMPROVEMENT OF GEOTECHNICAL MONITORING OF STRENGTHENING OF DEFORMED BUILDINGS ON PILE FOUNDATION

Object. Improve the geotechnical monitoring of the system “deformed building – driven prismatic piles in the composition of the strip grille – soil base with a weak underlying layer” before, during and after the supply of the existing grilles of the monolithic reinforced concrete slab. **Method.** Standard field and laboratory methods for determining the physical and mechanical properties of soils; normative methods of inspection of a technical condition of bearing building designs, their bases and the bases; methods of mathematical statistics for processing the results

© Ю. Л. Винников, С. М. Манжалій, 2020

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

of experiments; long-term geodetic observations of deformations of a brick building on a pile foundation before and after its strengthening. **Results.** A system of geotechnical monitoring and scientific and technical support of the system "deformed building – driven prismatic piles as part of a belt grid – soil base with a weak underlying layer" was developed and tested on a typical natural object before and after supplying monolithic reinforced concrete slabs, in particular: the actual parameters of its foundations and foundations and their changes over time are determined; conducted geodetic observations of the deformations of the object before, during and after its strengthening to establish patterns of development and stabilization of these deformations over time, etc. **Scientific novelty.** The structural and technological solution of strengthening the foundations of driven prismatic piles in the belt grid by bringing under the existing grilles monolithic reinforced concrete slab and obtained new research data on the change of stress-strain state of the system "deformed building – driving prismatic piles in the belt grid – soil weak underlying layer" due to the supply under the existing grilles of the plate. **The practical significance.** Developed and implemented in geotechnical practice constructive-technological solution of reinforcement of foundations from driven prismatic piles as a part of a tape grid by bringing under existing grilles of a monolithic reinforced concrete plate and the corresponding technique of geomonitoring.

Keywords: sand; poor-bearing soil; driven prismatic pile; reinforced concrete grille; settlement; crack; engineering status of the building; geotechnical monitoring; monolithic reinforced concrete slab

REFERENCES

- Briaud, J.-L. (2013). *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*. Wiley. (in English).
- EN 1990:2002/A1:2005/AC. (2010). *Eurocode: Basis of Structural Design*. Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC. (in English).
- Katzenbach, R. Leppla, S. Seip, M. & Kurze, S. (2015) Value Engineering as a basis for safe, optimized and sustainable design of geotechnical structures. *Proc. of the XVI European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. Edinburgh. 601-606. (in English).
- Vynnykov, Yu. & Manzhaliy, S. (2019) Residential building's deformation on pile foundation. *Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. Poltava: Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. 2(53), 98-106. (in English).
- Zotsenko, N. L. & Vinnikov, Y. L. (2016) Long-Term Settlement of Buildings Erected on Driven Cast-In-Situ Piles in Loess Soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 53(3), 189-195. (in English).
- Vinnikov, Yu. L., Kichaeva, O. V. & Sukhodub, A. V. (2014). Otsenka sovmestnoy raboty sistemy «osnovanie – sooruzhenie» pri nadstroyke. *Sovremennye geotekhnologii v stroitelstve i ikh nauchno-tekhnicheskoe soprovozhdenie: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* Sankt-Peterburg: SPbGASU, I, 130-136. (in Russian)
- DBN V.2.1-10:2018. *Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Zotsenko, M. L. & Vynnykov, Yu. L. (2019) *Fundamenti, shcho sporudzhuiutsia bez vyimannia gruntu*. Poltava: PolNTU imeni Yurii Kondratiuka. (in Ukrainian)
- Ilichev V. A. & Mangushev, R. A. (2014). *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenti i podzemnye sooruzheniya*. Moskva: Izd-vo ASV. (in Russian)
- Konovalov, P. A. & Konovalov, V. P. (2011). *Osnovaniya i fundamenti rekonstruiemykh zdaniy*. Moskva: Izd-vo ASV. (in Russian)
- Mangushev, R. A. & Nikiforova, N. S. (2017). *Tekhnologicheskie osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitelstva*. Moskva: Izd-vo ASV. (in Russian)
- Polishchuk, A. I. (2004). *Osnovy proektirovaniya i ustroystva fundamentov rekonstruiemykh zdaniy*. Nortkhempton: STT; Tomsk: STTY. (in Russian)
- Tuhaienko, Yu. F., Marchenko, M. V. Tklich, A. P. & Lohinova, L. O. (2018). *Pryroda deformuvannia gruntiv*. Odesa: Astroprint. (in Ukrainian)
- Ulitskiy, V. M., Shashkin, A. G. & Shashkin, K. G. (2010). *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie razvitiya gorodov*. Sankt-Peterburg: «Georekonstruktsiya». (in Russian)

Надійшла до редколегії 20.09.2020.

Прийнята до друку 16.10.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.14:699.84

Г. Е. ГУСЛИСТА^{1*}, Д. С. ЯРОШЕНКО²

^{1*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 47 44 17, ел. пошта GuslystaAnna@gmail.com, ORCID 0000-0002-4486-0630

² Кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 47 16 56, ел. пошта yaroshenko.denis.1@gmail.com, ORCID 0000-0002-2494-6082

ДИНАМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ЛОКАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО ПОШКОДЖЕННЯ БУДІВЕЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Мета. Проаналізувати наявні нормативні та наукові публікації щодо положень розрахунків на аварійні навантаження, пов'язані зі стійкістю до прогресуючого обвалення будівельних конструкцій, та динамічного впливу на будівельну конструкцію локального структурного пошкодження її елемента (відмови). Дослідити динамічний вплив на будівельну конструкцію локального структурного пошкодження її елемента шляхом лабораторного експерименту і числового моделювання. **Методика.** Для досягнення поставленої мети було проведено огляд існуючих нормативних документів різних країн і наукових публікацій щодо розрахунку та проектування будівель і споруд, стійких до прогресуючого обвалення. Було створено лабораторний стенд та проведено експериментальні та числові дослідження динамічної поведінки моделі будівельної конструкції. Лабораторний стенд було реалізовано у вигляді статично невизначуваної системи, так, щоб локальна відмова частини конструкції не призводила до руйнування всієї структури, а лише до якісної зміни її конфігурації. **Результати.** Під час лабораторного експерименту реєструвалися віброприскорення і вібропереміщення характерної точки конструкції. Шляхом обробки віброграм були отримані значення частот і логарифмічних декрементів вільних затухаючих коливань експериментального стенда, а також значення динамічного коефіцієнта при різних рівнях навантажень і видах відмов. Експериментальні дані перевірялись також числовим моделюванням. **Наукова новизна.** Проведені дослідження дозволяють оцінити динамічний вплив на конструкцію локальних структурних пошкоджень двох видів. Було виявлено, що навіть при співставних значеннях динамічних коефіцієнтів при різних видах відмов величини динамічних переміщень і прискорень можуть відрізнятися в декілька разів. **Практична значимість.** Отримані результати свідчать про те, що у випадках повних відмов елементів конструкцій вони отримують більші значення динамічних коефіцієнтів (напружень і прискорень), ніж конструкції, у яких відмови додаткових елементів супроводжуються частковим збереженням їхньої працездатності. У такому разі, в практичних, інженерних розрахунках, можна обмежитися розглядом саме таких повних відмов критичних елементів конструкцій, а можливість їхнього неповного виключення з роботи може бути віднесена в запас несучої здатності.

Ключові слова: локальне пошкодження; динамічний коефіцієнт; лабораторний експеримент; логарифмічний декремент коливань; віброприскорення; вібропереміщення

Вступ

Останніми роками все більше уваги приділяється проблемі безпеки будівель та споруд. Адже аварії об'єктів будівництва призводять до суттєвих економічних і людських жертв. Дуже часто причинами аварій стають вибухи, пожежі, землетруси, несподівані руйнування опор внаслідок якихось не передбачених нормативними документами впливів. В цій ситуації будівлі та споруди, запроектовані без урахування подібних навантажень та впливів, виявляються

не здатними протидіяти можливному лавиноподібному (прогресуючому) обваленню.

В інженерному середовищі зустрічається такий підхід до розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення: після того, як завершено розрахунок певного каркасу за основними сполученнями навантажень і впливів, проводиться додатковий розрахунок, у якому просто видаляється певний конструктивний елемент із розрахункової схеми (Руденко, Д. В., & Руденко, В. В., 2009). При цьому причина такого «видалення» і його можливий динамічний ефект можуть і не враховуватися. Аби цьому

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

запобігти, сучасні норми проєктування мають містити однозначні додаткові вимоги щодо розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення внаслідок локального пошкодження.

По-перше, огляд існуючих рекомендацій щодо розрахунку та проєктування дозволяє відмітити дуже багато спільного між підходами при розрахунку на сейсміку та на прогресуюче обвалення. Адже метою розрахунків на стійкість до прогресуючого руйнування є розробка таких конструктивних рішень будівель, щоб виключення певного елемента не призводило до непропорційного лавиноподібного руйнування всієї будівлі загалом. Тут прослідковується чітка аналогія з вже відомими і колись досліджуваними спорудами, що мають в'язі, які виключаються, для сейсмічних районів (Айзенберг, 1976). Ці споруди мають резервні зв'язки, які повинні виключитись з роботи за задумом проєктувальника. І їх виключення не має призвести до руйнування всієї споруди в цілому завдяки перебудові внутрішньої структури системи.

По-друге, аналіз чинних на сьогодні вітчизняних та закордонних нормативних документів дозволяє виділити американські норми (UFC 4-023-03, 2016) як найбільш «насичені» та найбільш цікаві для ознайомлення. На їхньому фоні норми інших країн значно відстають. При цьому особливої уваги в американських нормах заслуговують підрозділи, що стосуються врахування впливу динамічного ефекту під час прогресуючого руйнування та дані про коефіцієнти динамічності.

Справа в тому, що прогресуюче руйнування є наслідком відмови певного елемента або елементів конструкції. При цьому відмова може бути миттєвою, а може тривати певний період часу ($t_{\text{відмови}}$) залежно від причини цієї відмови. Згідно з прийнятими позначеннями (Дробот, 2020a; Дробот, 2020b) $t_{\text{відмови}}$ – це час відмови, впродовж якого конструкція, отримавши «негативний імпульс», «зависає» в своєму вихідному положенні за рахунок сил інерції, а потім починає рух вже в пошкоджені вигляді. При $t_{\text{відмови}}$ більше ніж 1...1,5 с динамічний сплеск зусиль після руйнування елемента стає несуттєвим і задачу можна розв'язувати в квазістатичній постановці, яка передбачає врахування коефіцієнта динамічності ($k_{\text{дин, max}} \leq 1,25$). Наприклад, при квазістатичному розрахунку в ПК ЛІРА (Кулябко, & Ярошенко, 2012; Гуслиста,

Кожанов, & Ярошенко, 2019) до розрахункової моделі прикладаються два завантаження. В першому завантаженні моделюються всі постійні та довготривалі навантаження на конструкцію, а в другому задається певний коефіцієнт динамічності. Для цього у вузол зруйнованого елемента задається зусилля, що дорівнює певній частині від зусилля в цьому елементі від сполучень попередніх завантажень. Потім за допомогою «Монтажних таблиць» моделюються стадії обвалення.

Слід зазначити, що призначення певного коефіцієнта динамічності при квазістатичному методі здійснюється майже навмання. До того ж не завжди $t_{\text{відмови}}$ менше ніж 1...1,5 с.

Отже, більш точним, а іноді і єдино можливим є динамічний розрахунок конструкцій на прогресуюче обвалення, який враховує швидкість руйнування певного елемента, тобто враховує час відмови $t_{\text{відмови}}$.

Отже, врахування фактору динаміки є на сьогодні дуже актуальним і існує багато робіт закордонних авторів, присвячених цьому питанню, а також визначенню динамічних коефіцієнтів (Mahmoudi, Teimoori, & Kozani, 2015; Mashhadiali, Kheyroddin, & Zahiri-Hashemi, 2016; Zhu, Chen, Yao, Keer, & Huang, 2018; Kong, Yang, Yang, & Zhou, 2020).

Українська нормативна література по темі прогресуючого обвалення представлена двома нормативними документами. ДБН В.1.2-14:2018 (2018) застосовує термін непропорційне (лавиноподібне) руйнування і вказує, для яких об'єктів слід виконувати розрахунки на непропорційні руйнування, а також приводить перелік заходів щодо зменшення імовірності таких руйнувань та їхніх наслідків. ДБН В.2.2-41:2019 (2019) надає більше конкретної інформації щодо проєктування стійких до прогресуючого обвалення будівель і споруд. Цей нормативний документ дає рекомендації стосовно вибору конструктивних схем, об'ємно-планувальних і технічних рішень, методу розрахунку. Але більшість з цих рекомендацій стосується переважно сталевих конструкцій. Запропонований українськими нормами метод розрахунку на прогресуюче обвалення є квазістатичним з коефіцієнтом динамічності не менше ніж 1,2 для конструкцій категорії А.

Аналіз публікацій та нормативної літератури свідчить про те, що досі немає ясності, якими мають бути величини динамічних коефіцієнтів при різних видах відмов.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Мета

Метою дослідження є визначення динамічного впливу на певну будівельну структуру відмови її елемента шляхом лабораторного експерименту і числового моделювання. Під відмовою тут мається на увазі виключення з роботи якогось елемента конструкції, при цьому вся конструкція отримує додаткові прогини (статичні і динамічні), але в цілому зберігає свою працездатність (цей елемент в подальшому називатимемо «додаткова конструкція»). Тобто лабораторний стенд планувався таким чином, що відмова додаткової конструкції не призводить до руйнування всієї структури, а лише до якісної зміни її конфігурації. В прийнятих термінах (Аугусти, Баратта, & Кашиати, 1988) досліджувана система відноситься до систем з «безпечною відмовою», коли при досягненні граничного стану в певній точці або елементі відбувається перерозподіл напружень і конструкція зберігає здатність сприймати додаткові навантаження.

Методика

Мірою динамічного впливу на конструкцію аварійної ситуації, спричиненої відмовою її елемента, було обрано динамічний коефіцієнт, як відношення максимального динамічного прогину індикативної точки конструкції до її статичного прогину після повного затухання коливань, збурених зміною схеми конструкції. Для визначення можливого діапазону значень динамічного коефіцієнта при різних видах відмов було обрано дві схеми відмови конструкції:

1) перший варіант відмови – «м'який». Відмова додаткового конструктивного елемента спричиняється втратою його стійкості, що ініціюється раптово прикладеним додатковим навантаженням. При цьому додатковий конструктивний елемент (у даному випадку – стійка з великою гнучкістю) не виключається з роботи повністю, а лише змінює її характер, переходячи від рівноважного стану першого роду до рівноважного стану другого роду. При цьому стійка отримує великі поперечні деформації, але все ще здатна сприймати частину навантажень від основної структури і передавати її на опору. Такий варіант відмови може розглядатись як спосіб моделювання випадку падіння частини перекриття на розташовані нижче

конструкції з частковим зменшенням їх несучої здатності. В лабораторному експерименті конструкція навантажувалася початковим зосередженим навантаженням, що не було критичним з точки зору втрати стійкості додаткової конструкції (відстань від опори консолі – 480 мм, загальний вигляд експериментальної установки наведено на рис. 1). Таким чином, вся конструкція спочатку перебувала у стані рівноваги. Потім раптово прикладалося додаткове навантаження у ту ж точку, при цьому сумарне навантаження вже ставало критичним для стійки і вона втрачала стійкість.

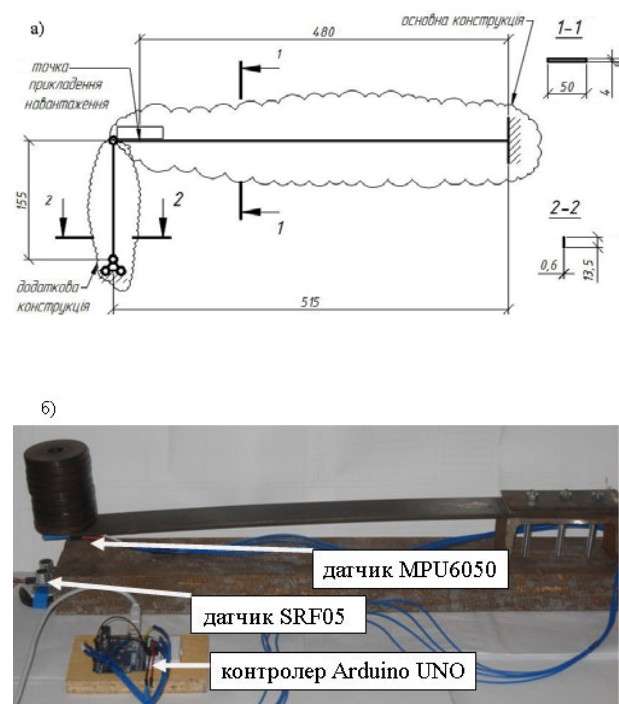


Рис. 1. Експериментальна конструкція:

- а) розрахункова схема експериментальної конструкції;
б) загальний вигляд експериментальної балки зі встановленими датчиками та контролером Arduino UNO

2) другий варіант відмови – «жорсткий» – майже миттєве (час вимкнення в декілька разів менше періоду власних коливань конструкції, отриманої внаслідок відмови) і повне виключення додаткового конструктивного елемента з роботи при постійному рівні навантаження. При такому варіанті відмови змінюється лише жорсткість системи.

Стенд для лабораторних досліджень. Основна конструкція, поведінка якої досліджується при відмові певного конструктивного елемента

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

– консольна балка з додатковою опорою. Параметри консольної балки такі: довжина 515 мм, відстань від затиснення до центра ваги зосередженої маси – 480 мм, переріз – прямокутний 50×4 мм, матеріал – Ст. 3. Додаткова опора – шарнірно обперта вертикальна стійка, що розташована на кінці консольної балки. Висота стійки – 155 мм, переріз – 0,6×13,5 мм, матеріал – Ст. 3. Як видно з параметрів стійки (гнучкість у напрямку найменшої жорсткості близько 900), це дуже гнучка конструкція, втрата стійкості якої не супроводжуватиметься помітними пластичними деформаціями при обраних параметрах системи. Для завантаження конструкції застосовувалися сталеві шайби масою 0,25 кг кожна.

Під час лабораторного експерименту реєструвалися віброприскорення та вібропереміщення характерної точки конструкції (кінець консольної балки). Шляхом обробки віброграм були отримані значення частот і логарифмічних декрементів вільних затухаючих коливань експериментального стенда, а також значення динамічного коефіцієнта у кожному конкретному випадку. Експериментальні дані перевірялись також числовим моделюванням (використовувався програмний комплекс SCAD Office 21.1). Для реєстрації реакції балки застосовувалось таке обладнання: персональний комп'ютер, контролер Arduino UNO, датчик прискорень MPU6050 і ультразвуковий датчик дистанції SRF05 (використовувався для контролю статичних прогинів кінця консольної балки). Вибір переліченого обладнання для проведення експериментальної частини роботи було зумовлено його доступністю та прийнятною точністю.

Датчик прискорень MPU6050 використовує п'єзоелектричний ефект і дозволяє реєструвати та передавати на комп'ютер значення прискорень і кутових переміщень по трьох взаємно перпендикулярних осях (таким чином, датчик має 6 ступенів вільності – 3 лінійні і 3 кутові). Однак такі датчики потребують калібрування, оскільки їх чутливий елемент може бути змонтовано на плату з певними відхиленнями, тому на підготовчому етапі було проведено калібрування датчика прискорень. Деякі прийоми цього процесу описані в спеціальній літературі (Капля, Савицкий, & Мاستиков, 2018; Редченко, 2013; Редченко, 2014; Жмудь, Кузнецов, Кондратьев, Трубин, & Трубин, 2018). Програ-

мна реалізація взаємодії датчиків MPU6050 і SRF05 з контролером Arduino і комп'ютером також описана різними авторами (Карвинен, Т., Карвинен, К. & Валтокари, 2015; Монк, 2017). Дані з датчиків зчитувались з кроком 0,004 с.

Результати

Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 1. Отримані експериментальні дані розбиті на два блоки – для першого і для другого варіантів відмови.

В табл. 1 прийняті такі позначення:

ω – частота вільних затухаючих коливань;

δ – логарифмічний декремент;

μ – динамічний коефіцієнт;

Δ_D – максимальний динамічний прогин індикативної точки конструкції після вимкнення додаткового елемента;

Δ_S – максимальний статичний прогин індикативної точки конструкції після вимкнення додаткового елемента.

Колонка «Зосереджене навантаження» розбита на 3 стовпчики:

« m_0 » – початкове значення маси в точці прикладення навантаження (див. рис. 1, а), що для першого варіанта відмови відповідає стану статичної рівноваги;

« m_s » – для першого варіанта відмови ϵ , так би мовити, ініціюючим навантаженням, при якому стійка втрачає стійкість;

« m_Σ » – значення маси, що залишається в точці прикладення навантаження після відмови елемента конструкції.

Експериментально було встановлено, що *логарифмічний декремент вільних затухаючих коливань консольної балки без додаткової стійки змінюється несуттєво в межах 0,0115...0,0123 в залежності від величини зосередженої маси на кінці консолі (розглядався діапазон навантажень від 1,75 кг до 2,5 кг, що відповідає діапазону навантажень за першим і другим варіантами відмов). Питання залежності величин логарифмічних декрементів від частоти вільних коливань або напружень в елементах конструкцій в цій роботі не розглядається.*

Логарифмічні декременти системи з *додатковою стійкою* виявилися в 1,4...2,5 рази вищими, але діапазон їх змін більш широкий (див. табл. 1).

Результати експериментальних досліджень

Варіант відмови	№ з/п	Зосереджене навантаження, кг			Показники вільних затухаючих коливань		Максимальний прогин, мм		μ
		m_0	m_s	m_Σ	ω , Гц	δ	Δ_D	Δ_S	
Перший	1	0,5	1,25	1,75	4,637	0,029	5,196	4,558	1,14
	2	0,5	1,5	2	4,113	0,028	8,564	5,254	1,63
	3	0,5	1,75	2,25	3,797	0,016	10,800	5,95	1,815
	4	1	0,75	1,75	4,637	0,029	6,892	4,558	1,512
	5	1	1	2	4,113	0,028	10,172	5,254	1,936
	6	1	1,25	2,25	3,797	0,016	11,010	5,95	1,85
Другий	7	1,75	0	1,75	4,133	0,0123	30	15,25	1,97
	8	2	0	2	3,913	0,0120	33,8	17,07	1,983
	9	2,25	0	2,25	3,733	0,0115	37,5	18,9	1,982

Характерний вигляд експериментальних акселерограм наведено на рис. 2. В легенді графіка наведено номер експериментальної віброграми відповідно до значень колонки «№ з/п» табл. 1. Перехідний процес, що відповідає часу прикладення навантаження і процесу втрати

стійкості стійки займає до 0.1 с. Із якісного аналізу графіка видно, що частота і логарифмічний декремент коливань для варіантів «3» і «6» однакові, а прискорення у стаціонарному режимі вільних затухаючих коливань відрізняються на певну сталу величину.

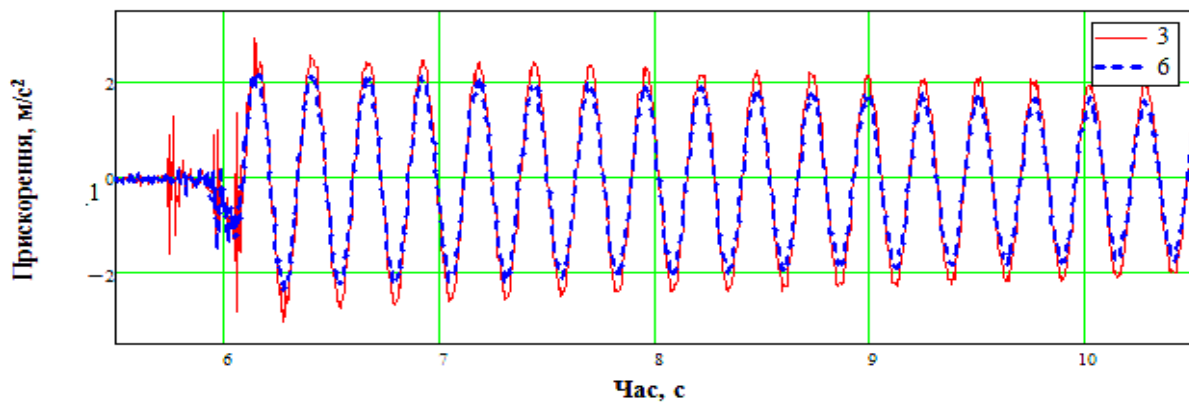


Рис. 2. Характерний вигляд експериментальних акселерограм для першого варіанта відмов

У графічному вигляді результати експериментальних досліджень наведено на рис. 3, де легенда графіка відповідає графі «№ з/п» табл. 1. Результати представлені у вигляді залежності величини динамічного коефіцієнта від частоти вільних затухаючих коливань системи після відмови елемента конструкції.

Окрім експериментальних досліджень було проведено числове моделювання відмов моделі конструкції засобами програмного комплексу © Г. Е. Гуслиста, Д. С. Ярошенко, 2020

SCAD Office 21.1. Основна мета такого моделювання – перевірити принципову можливість моделювання таких аварійних впливів на будівельні конструкції, як відмови її частин, одним із найбільш популярних програмних комплексів, що використовуються вітчизняними інженерами. Використовувався модуль, що реалізує пряме інтегрування рівнянь руху скінченно-елементної моделі. Нажаль, авторам не вдалося отримати результати в геометрично нелінійній

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

постановці у часовій області за першим варіантом відмов, що можна було б співставляти з експериментальними даними.

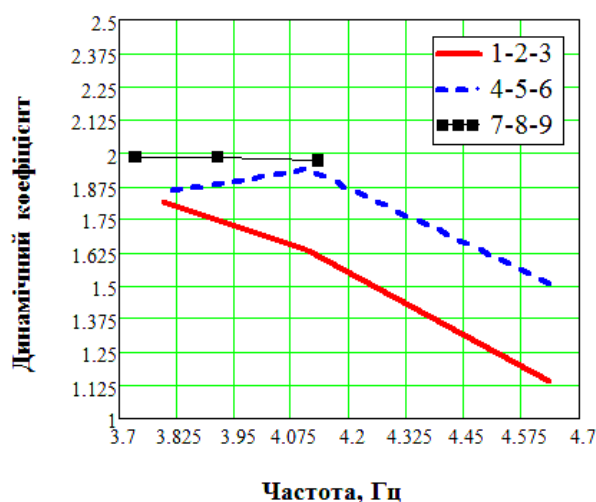


Рис. 3. Залежність зміни динамічних коефіцієнтів від величини частоти вільних затухаючих коливань конструкції за різними варіантами відмов

Проте за більш простішим з точки зору моделювання другим варіантом було отримано майже повну відповідність експериментальних і числових результатів (рис. 4). На рис. 4 при-

ведено фрагмент експериментальної (в легенді графіка «експеримент») і отриманої числовим методом (в легенді графіка «scad») акселерограми процесу коливань, збурених відмовою за другим варіантом (п. 7 табл. 1).

Моделювання відмови конструкції в ПК SCAD Office 21.1 відбувалося таким чином: при прийнятій схемі навантажень конструкції була обчислена опорна реакція в елементі, відмова якого моделюється. На наступному етапі даний елемент (або в'язь, що його моделює) видаляється із розрахункової схеми, натомість прикладається динамічне навантаження, що спочатку дорівнює опорній реакції елемента, а потім за певним законом зменшується до нуля. «Різкістю» зміни значення даного динамічного навантаження від повної величини опорної реакції до нуля можна моделювати різні варіанти вимкнення певного елемента із роботи. У даному випадку динамічне навантаження змінювалося різко (відповідно до прийнятого кроку інтегрування – 0,001 с). Логарифмічний декремент коливань задавався відповідно до попередньо визначеного експериментального значення.

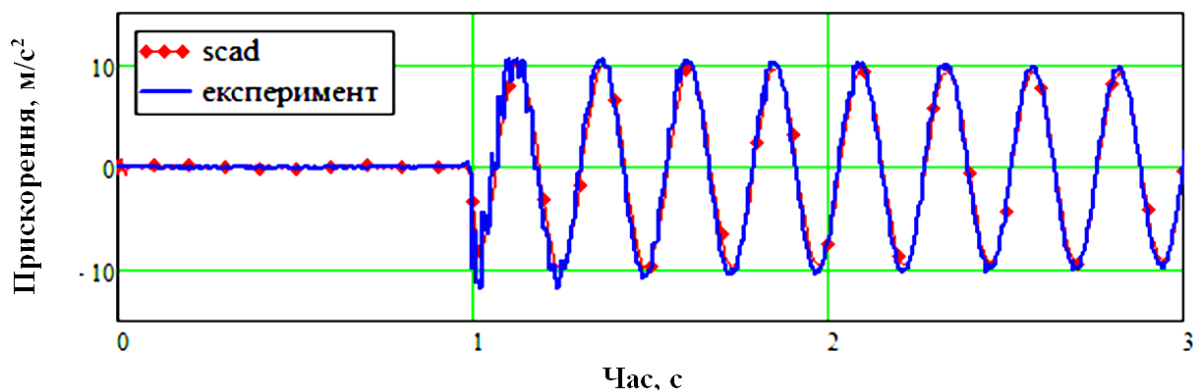


Рис. 4. Фрагмент експериментальної і отриманої числовим методом акселерограми процесу коливань, збурених відмовою додаткового елемента за другим варіантом

Як видно із графіків рис. 2 і рис. 4 динамічні прискорення, що супроводжують відмови конструкцій, при прийнятих параметрах в даній роботі, суттєво відрізняються при досить близьких значеннях динамічних коефіцієнтів (див. акселерограми рис. 2 і рис. 4). При значеннях динамічних коефіцієнтів, що змінюються в діапазоні 1,815...2,0, значення прискорень відрізняються майже в 4 рази (від 2...2,5 м/с² для варіантів відмови зі стійкою 3 і 6 до близько

10 м/с² для варіанта відмови). Тобто в перехідному процесі відбувався короткочасний відрив маси (що не закріплювалася, а просто лежала на поверхні балки) від поверхні балки (що і спостерігалось під час експериментів (див. п. 7, 8, 9 табл. 1). Така різниця в прискореннях пояснюється такою ж різницею в динамічних прогинах конструкцій за двома варіантами відмов (див. табл. 1).

Наукова новизна та практична значимість

Динамічні коефіцієнти, як відношення максимального динамічного переміщення певної точки конструкції до її статичного переміщення внаслідок певного динамічного навантаження, в залежності від виду відмов можуть змінюватися в досить широкому діапазоні значень і залежать від виду відмови. Тому при необхідності розрахунків будівельних конструкцій на прогресуюче обвалення, пропонується враховувати очікуваний вид відмови і конструктивні особливості споруд, що проєктуються стійкими до прогресуючого обвалення. Дане твердження підтверджується тим, що навіть при співставних значеннях динамічних коефіцієнтів при різних видах відмов величини динамічних прискорень можуть відрізнятися в декілька разів. Було виявлено, що системи, у яких відбувалася повна відмова додаткового елемента отримують більші динамічні переміщення (а, отже, напруження і прискорення), ніж системи з неповним виключенням додаткового елемента. До того ж, наявність такого «недозруйнованого» елемента може підвищувати логарифмічний декремент конструкції, що, у свою чергу, полегшує роботу конструкції при динамічних навантаженнях. Також слід відмітити більш широкий діапазон змін значень динамічних коефіцієнтів та логарифмічних декрементів коливань у системі з неповним виключенням додаткового елемента (тут, перший варіант відмови), що пояснюється суттєвою нелінійністю роботи додаткового елемента конструкції (геометричною, оскільки відбулася втрата стійкості, фізичною – тертя в опорних вузлах і пластичні деформації стержня елемента).

Отримані результати свідчать про те, що у випадках повних відмов елементів конструкцій, вони отримують більші значення динамічних коефіцієнтів (напружень і прискорень), ніж конструкції, у яких відмови додаткових елементів супроводжуються частковим збереженням їхньої працездатності. У такому разі, в практичних, інженерних розрахунках, можна обмежитися розглядом саме таких повних відмов критичних елементів конструкцій, а можливість їхнього неповного виключення з роботи може бути віднесена в запас несучої здатності. Також була показана принципова можливість моделювання аварійних ситуацій у вигляді повного раптового виключення додаткового конструк-

© Г. Е. Гуслиста, Д. С. Ярошенко, 2020

тивного елемента засобами одного із програмних комплексів на базі МСЕ у часовій області.

Висновки

У даній роботі досліджувався динамічний вплив на певну структуру відмови її елемента. Результати аналізу нормативних документів і наукових публікацій, а також лабораторних та числових досліджень дозволяють зробити такі висновки:

1) аналіз публікацій та нормативної літератури свідчить про те, що вітчизняна нормативна база відстає від закордонних аналогів щодо роз'яснень положень розрахунків на аварійні навантаження, пов'язані зі стійкістю до прогресуючого обвалення будівельних конструкцій, досі немає ясності, якими мають бути величини динамічних коефіцієнтів при різних видах відмов;

2) у залежності від виду відмови динамічний вплив на будівельну конструкцію може суттєво відрізнятися навіть при різних варіантах відмови одного і того ж конструктивного елемента (наприклад, повне і різке руйнування або більш плавне, неповне руйнування, що супроводжується лише частковим виключенням елемента із роботи);

3) оскільки у випадках повних відмов елементів конструкцій, вони отримують більші динамічні переміщення (напруження) і прискорення, в практичних розрахунках можна обмежитися розглядом саме таких повних відмов критичних елементів конструкцій, а можливість їхнього неповного виключення з роботи може бути віднесена в запас несучої здатності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance (2016).
Kong, D.-Y., Yang, Y., Yang, B., & Zhou, X.-H. (2020). Experimental Study on Progressive Collapse of 3D Steel Frames under Concentrated and Uniformly Distributed Loading Conditions. *Journal of Structural Engineering*, 146(4).
Mahmoudi, M., Teimoori, T., & Kozani, H. (2015). Presenting displacement-based nonlinear static analysis method to calculate structural response against progressive collapse. *International Journal of Civil Engineering*, 13(4A), 478-485.
Mashhadiali, N., Kheyroddin, A., & Zahiri-Hashemi, R. (2016). Dynamic Increase Factor for Investigation of Progressive Collapse Potential in Tall Tube-Type

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Buildings. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(6).
- UFC 4-023-03 (2016). Design of buildings to resist progressive collapse.
- Zhu, Y., Chen, Ch., Yao, Y., Keer, L. M., & Huang, Y. (2018). Dynamic increase factor for progressive collapse analysis of semi-rigid steel frames. *Steel and Composite Structures*, 28(2), 209-221.
- Айзенберг, Я. М. (1976). *Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов*. Москва: Стройиздат.
- Аугусти, Г., Баратта, А., & Кашиати, Ф. (1988). *Вероятностные методы в строительном проектировании*. Москва: Стройиздат.
- Гуслиста, Г. Е., Кожанов, Ю. О., & Ярошенко, Д. С. (2019). *Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи (тема «Розрахунок простої рами на стійкість до прогресуючого обвалення»)*. Дніпро: ДВНЗ ПДАБА.
- ДБН В.1.2-14:2018 (2018). Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.
- ДБН В.2.2-41:2019 (2019). Висотні будівлі. Основні положення.
- Дробот, Д. Ю. (2020a). *Возможные технологии расчета на прогрессирующее обрушение: учебное пособие*. Москва. URL: https://ridero.ru/books/vozmozhnye_tekhnologii_rascheta_na_progressiruyushee_obrushenie/
- Дробот, Д. Ю. (2020b). *Прогрессирующее обрушение и живучесть конструкций: Блог о вопросах прогрессирующего обрушения и живучести конструкций*. URL: <https://dwg.ru/b/d1985>
- Жмудь, В. А., Кузнецов, К. А., Кондратьев, Н. О., Трубин, В. Г., & Трубин, М. В. (2018). Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике. *Автоматика и программная инженерия*, 3 (25), 9-22.
- Капля, В. И., Савицкий, И. В., & Мاستиков, Д. А. (2018). Калибровка трехосного акселерометра по данным ряда измерений с различной ориентацией. *Инженерный вестник Дона*, 2.
- Карвинен, Т., Карвинен, К., & Валтокари, В. (2015). *Делаем сенсоры: проекты сенсорных устройств на базе Arduino и Raspberry Pi*. Москва: ООО «И.Д. Вильямс».
- Кулябко, В. В., & Ярошенко, Д. С. (2012). Особенности собственных колебаний регулярных рамных строительных конструкций на примере одноэтажных многопролетных рам. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 2, 22-30.
- Монк, С. (2017). *Программируем Arduino: профессиональная работа со скетчами*. Санкт-Петербург: Питер.
- Редченко, В. П. (2013). Экспериментальне визначення постійних напружень в залізобетонних конструкціях. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 4, 82-88.
- Редченко, В. П. (2014). Аналіз результатів динамічних випробувань мостів з використанням програми «СпектрУМ». *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 6, 119-125.
- Руденко, Д. В., & Руденко, В. В. (2009). Защита каркасных зданий от прогрессирующего обрушения. *Инженерно-строительный журнал*, 3, 38-41.

А. Э. ГУСЛИСТАЯ^{1*}, Д. С. ЯРОШЕНКО²,

^{1*} Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47 44 17, эл. почта GuslystaAnna@gmail.com, ORCID 0000-0002-4486-0630

² Кафедра металлических, деревянных и пластмассовых конструкций, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47 16 56, эл. почта yaroshenko.denis.1@gmail.com, ORCID 0000-0002-2494-6082

ДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ЛОКАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Цель. Проанализировать существующие нормативные и научные публикации, содержащие положения расчетов на аварийные нагрузки, связанные с устойчивостью к прогрессирующему обрушению строительных конструкций, а также данные о динамическом влиянии на строительную конструкцию локального структурного повреждения ее элемента (отказа). Исследовать динамическое влияние на строительную конструкцию локального структурного повреждения ее элемента путем лабораторного эксперимента и численного моделирования. **Методика.** Для достижения поставленной цели был проведен обзор существующих нормативных документов разных стран и научных публикаций по расчету и проектированию зданий и сооружений, устойчивых к прогрессирующему обрушению. Был создан лабораторный стенд и проведены экспериментальные и численные исследования динамического поведения строительной конструкции. Лабо-

© Г. Е. Гуслиста, Д. С. Ярошенко, 2020

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

торный стенд был реализован в виде статически неопределимой системы, так, чтобы локальный отказ части конструкции не приводил к разрушению всей структуры, а только к качественному изменению ее конфигурации. **Результаты.** Во время лабораторного эксперимента регистрировались виброускорения и виброперемещения характерной точки конструкции. Путем обработки виброграмм были получены значения частот и логарифмических декрементов свободных затухающих колебаний экспериментального стенда, а также значения динамического коэффициента при различных уровнях нагрузок и видах отказов. Экспериментальные данные проверялись также числовым моделированием. **Научная новизна.** Проведенные исследования позволяют оценить динамическое влияние на конструкцию локальных структурных повреждений двух видов. Было выявлено, что даже при сопоставимых значениях динамических коэффициентов при различных видах отказов величины динамических перемещений и ускорений могут отличаться в несколько раз. **Практическая значимость.** Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случаях полных отказов элементов конструкций они получают большие значения динамических коэффициентов (напряжений и ускорений), чем конструкции, у которых отказы дополнительных элементов сопровождаются частичным сохранением их работоспособности. В таком случае в практических инженерных расчетах можно ограничиться рассмотрением именно таких полных отказов критических элементов конструкций, а возможность их неполного выключения из работы может быть отнесено в запас несущей способности.

Ключевые слова: локальное повреждение; динамический коэффициент; лабораторный эксперимент; логарифмический декремент колебаний; виброускорение; виброперемещение

A. E. GUSLYSTA^{1*}, D. S. YAROSHENKO²

^{1*} Department of Reinforced concrete and Masonry Constructions, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24-A, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (0562) 47 44 17, e-mail GuslystaAnna@3g.ua, ORCID 0000-0002-4486-0630

² Department of Metallic, Wooden and Plastic Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24-A, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (0562) 47 16 56, e-mail YaroshenkoDenis@i.ua, ORCID 0000-0002-2494-6082

DYNAMIC EFFECTS BY THE STRUCTURAL DAMAGE OF THE BUILDING STRUCTURE

Purpose. To review the standards and the scientific literature on emergency load calculations that are linked with stability to progressive collapse of building structures and dynamic influence of localized structural component damage (failure) on the building structure. To study the dynamic influence on the building structure of its localized structural component damage by laboratory experiment and numerical simulation. **Methodology.** To reach the goal the existing standards and the scientific literature of different countries on calculations and design of resistant to progressive collapse buildings and structures were reviewed. The laboratory bench was created. Experimental and numerical studies were conducted by modelling dynamic behaviour of the building structure. The laboratory bench was statically indeterminate system in order to localized structural component damage (failure) did not lead to the hole structure destruction but only to its qualitative reconfiguration. **Findings.** During the laboratory experiment the vibrational accelerations and displacements for characteristic point of structure were registered. By processing vibrational diagrams, the values of the frequencies and the laboratory bench free vibrations logarithmic decrements were received, as well as the value of the dynamic increase factor by different load levels and different failure types. Experimental results were checked by numerical simulation. **Originality.** The studies allow to evaluate dynamic effect of localized structural component damage two types. It was also discovered that the values of dynamic displacements and accelerations may be different by several times by the comparable values of the dynamic increase factors of different failure types. **Practical value.** The results suggest that in the case of total structural component failure the value of dynamic increase factor (stresses and accelerations) is more than that in the case of structural component damages while retaining partial functionality. In such a case when carrying out practical engineering calculations it would be sufficient to consider the total structural component failure while the possibility of partial damages would be as reserve of power.

Keywords: localized damage; dynamic increase factor; laboratory experiment; vibrational logarithmic decrements; vibrational accelerations and displacements

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

REFERENCES

- GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance (2016). (in English)
- Kong, D.-Y., Yang, Y., Yang, B., & Zhou, X.-H. (2020). Experimental Study on Progressive Collapse of 3D Steel Frames under Concentrated and Uniformly Distributed Loading Conditions. *Journal of Structural Engineering*, 146(4). (in English)
- Mahmoudi, M., Teimoori, T., & Kozani, H. (2015). Presenting displacement-based nonlinear static analysis method to calculate structural response against progressive collapse. *International Journal of Civil Engineering*, 13(4A), 478-485. (in English)
- Mashhadiali, N., Kheyroddin, A., & Zahiri-Hashemi, R. (2016). Dynamic Increase Factor for Investigation of Progressive Collapse Potential in Tall Tube-Type Buildings. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(6). (in English)
- UFC 4-023-03 (2016). Design of buildings to resist progressive collapse. (in English)
- Zhu, Y., Chen, Ch., Yao, Y., Keer, L. M., & Huang, Y. (2018). Dynamic increase factor for progressive collapse analysis of semi-rigid steel frames. *Steel and Composite Structures*, 28(2), 209-221. (in English)
- Ayzenberg, Ya. M. (1976). *Sooruzheniya s vyklyuchayushchimisya svyazymi dlya seysmicheskikh rayonov*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)
- Augusti, G., Baratta, A., & Kashiati, F. (1988). *Veroyatnostnye metody v stroitelnom proektirovanii*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)
- Huslysta, H. E., Kozhanov, Yu. O., & Yaroshenko, D. S. (2019). *Metodychni vказivky do vykonannya kvalifikatsiinoi roboty (tema «Rozrakhunok prostorovoi ramy na stiikist do prohresuiuchoho obvalennia»)*. Dnipro: DVNZ PDABA. (in Ukrainian)
- DBN V.1.2-14:2018 (2018). *Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud*. (in Ukrainian)
- DBN V.2.2-41:2019 (2019). *Vysotni budivli. Osnovni polozhennia*. (in Ukrainian)
- Drobot, D. Yu. (2020a). *Vozmozhnye tekhnologii rascheta na progressiruyushchee obrushenie: uchebnoe posobie*. Moskva. URL: https://ridero.ru/books/vozmozhnye_tekhnologii_rascheta_na_progressiruyushchee_obrushenie/ (in Russian)
- Drobot, D. Yu. (2020b). *Progressiruyushchee obrushenie i zhivuchest konstruktivnykh: Blog o voprosakh progressiruyushchego obrusheniya i zhivuchesti konstruktivnykh*. URL: <https://dwg.ru/b/d1985> (in Russian)
- Zhmud, V. A., Kuznetsov, K. A., Kondratev, N. O., Trubin, V. G., & Trubin, M. V. (2018). Akselerometr i giroskop MPU6050: pervoe vkluchenie na STM32 i issledovanie pokazaniy v statike. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*, 3 (25), 9-22. (in Russian)
- Kaplya, V. I., Savitskiy, I. V., & Mastikov, D. A. (2018). Kalibrovka trekhosnogo akselerometra po dannym ryada izmereniy s razlichnoy orientatsiei. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2. (in Russian)
- Karvinen, T., Karvinen, K., & Valtokari, V. (2015). *Delaem sensory: proekty sensorykh ustroystv na baze Arduino i Raspberry Pi*. Moskva: OOO «I.D. Vilyams». (in Russian)
- Kulyabko, V. V., & Yaroshenko, D. S. (2012). Osobennosti sobstvennykh kolebaniy regul'yarnykh ramnykh stroitelnykh konstruktivnykh na primere odnoetazhnykh mnogoproletnykh ram. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 2, 22-30. (in Russian)
- Monk, S. (2017). *Programmiruem Arduino: professionalnaya rabota so sketchami*. Sankt-Peterburg: Piter. (in Russian)
- Redchenko, V. P. (2013). Eksperymentalne vyznachennia postiinykh napruzhen v zalizobetonnykh konstruktivnykh. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 4, 82-88. (in Ukrainian)
- Redchenko, V. P. (2014). Analiz rezultativ dynamichnykh vyprobuvan mostiv z vykorystanniam prohramy «SpektrUM». *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 6, 119-125. (in Ukrainian)
- Rudenko, D. V., & Rudenko, V. V. (2009). Zashchita karkasnykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*, 3, 38-41. (in Russian)

Надійшла до редколегії 30.09.2020.

Прийнята до друку 23.10.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 69.05:[338.242.2:519.85/.77]

Н. О. ДАНКЕВИЧ*

* Кафедра «Промислове та цивільне будівництво», Інженерний інститут Запорізького національного університету, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (066) 482 42 78, ел. пошта DankevichNatali28@gmail.com, ORCID 0000-0002-7146-9303

ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТУ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА ДИНАМІЧНОСТІ З ДОТРИМАННЯМ ПРИНЦИПІВ САМОРЕГУЛЯЦІЇ

Мета. Дослідження системи організації будівництва та визначення шляхів підвищення організаційно-технологічної надійності будівельного проєкту на основі законів системотехніки в умовах трансформації економічних відносин будівельної галузі. **Методика.** Важливу роль в дослідженні відіграє формування знань і вмінь використання сучасного проєктного підходу до вирішення завдань розвитку процесів управління організаційно-технологічними параметрами на різних рівнях, орієнтації цих процесів на досягнення кінцевих результатів з мінімальними витратами часу та коштів і засвоєння методології управління будівельними проєктами, як нового прогресивного інструментарію сфери організації будівництва. **Результати.** В роботі проведено аналіз управлінських процесів реалізації будівельних проєктів, як правило, пов'язане з низькою факторів, які впливають на хід будівельного проєкту. Розглянуті принципи моделювання організаційно-технологічних рішень та їх системотехнічна оцінка, яка має вирішальне практичне значення для визначення конкурентоспроможності будівельних проєктів в умовах невизначеності та динамічності вітчизняного будівельного сектору. **Наукова новизна.** На основі принципів системотехніки, а також законів управління проєктами визначені шляхи підвищення надійності за рахунок оптимального вибору варіантів організаційно-технологічних рішень, у зв'язку з цим будівельна організація вирішує, яку величину прибутку і з якою вірогідністю вона згодна понести з урахуванням різноманітності стану системи. **Практична значимість.** Застосування концепції управління будівельними проєктами та використання принципу системотехніки є одним з основних напрямів оптимізації організаційно-технологічних рішень забезпечення конкурентної спроможності будівельних проєктів в умовах трансформації ринку будівельних послуг.

Ключові слова: будівельний проєкт; організаційно-технологічні рішення; системотехніка; конкурентоспроможність

Вступ

Сучасне економічне життя відрізняється мілливистістю. На даний час діяльність будівельних підприємств організовується в рамках конкретних проєктів, причому доводиться вирішувати завдання, виконання яких вимагає інтеграції різних функціональних областей і видів діяльності. Цей чинник пред'являє високі вимоги до адаптаційних здібностей будівельних організацій, які потребують посиленої уваги і суттєвих змін в організаційних, виробничих і управлінських стосунках між усіма учасниками інвестиційно-будівельної діяльності на всіх етапах реалізації будівельного проєкту.

В умовах невизначеності та динамічності на оптимальність організаційно-технологічних рішень (ОТР) в будівництві впливає велика кі-

лькість чинників, частина з них є причинами виникнення ризиків, інші – в якості заходів (організаційних, технічних і технологічних), що забезпечують зниження впливу цих ризиків. Ці обставини зумовлюють необхідність розробки ефективної системи організації та управління вибору оптимального варіанту ОТР.

Разом з тим існує ряд обмежень, до них відносяться: загальний спад виробництва і нестійке функціонування економіки; недостатня політична стабільність (як додатковий фактор ризику); різке скорочення державних інвестицій і спад інвестиційної активності; стійко висока інфляція; недостатня розвиненість кредитно-фінансової та банківської систем, стримуюча оборот інвестицій і капіталів; відсутність надійної системи забезпечення гарантій і пільг для інвесторів, в тому числі іноземних.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Тому в умовах динамічного функціонального середовища існування будівельного підприємства, як базової самостійної одиниці, на всіх стадіях проєкту (здуму-обґрунтування-реалізації-експлуатації) будівельного проєкту постає необхідність створення та обґрунтування сучасної системи прийняття, реалізації та відповідності організаційно-технологічних рішень на всіх стадіях життєвого циклу будівельного проєкту.

Мета

Теоретичним підґрунтям стали дослідження (Бушуєв, 1980; Голенко, 1968; Гусаков, 2004; Млодецький, & Ценацевич, 2015; Радкевич, & Павлов, & Данкевич, 2018; Радкевич, & Данкевич, 2011; Тугай, 2008; Тянь, & Холод, & Ткаченко, 2000). У зазначених наукових працях науково-методологічною передумовою успішного вирішення поставлених завдань є положення теорій: дослідження операцій, систем і системного аналізу, імовірності і математичної статистики, графів і сітьового аналізу, системотехніки будівництва, оптимального програмування та впровадження науково-методичних платформ які дістали широке використання в моделюванні основ вироблення оптимальних організаційно-технологічних рішень будівельного виробництва. Однак їх використання не дозволяє враховувати ступінь ризиків при оптимальних організаційно-технологічних рішеннях.

Методика

Серед передумов, що сприятимуть стимулюванню економічного зростання важливу роль відіграє формування знань і вмінь використання сучасного проєктного підходу до вирішення завдань розвитку процесів саморегуляції на різних рівнях, орієнтації цих процесів на досягнення кінцевих результатів з мінімальними витратами часу та коштів і засвоєння методології управління будівельними проєктами, як нового прогресивного інструментарію організації будівництва.

Розробкою і реалізацією проєктів люди займаються з давніх часів. Особливо це відноситься до будівельних проєктів. Останнім часом в умовах глобалізації економіки та збільшення темпів розвитку суспільства, коли все більш жорсткими стають обмеження в сфері виробництва за часом, ресурсами і ризиків. У

зв'язку з цим використання принципів управління проєктами стає все більш затребуваним і життєво важливим, так як дозволяють ефективно управляти, створювати значні конкурентні переваги, формувати нові сегменти ринку, вільні на певний період від конкурентної боротьби в силу унікальних пропозицій.

Управлінням у широкому сенсі є спрямований вплив однієї системи (суб'єкта) на іншу (об'єкт управління). Управління характеризується широким різноманіттям понять, має різноманітні зовнішні і внутрішні цілі і завдання, використовує економічні, соціальні, правові, психологічні, природні та інші науки. В роботах (Павлов, 2003; Радкевич, & Арутюнян, & Данкевич, 2017; Данкевич, 2020а) його теоретичну базу складають, перш за все, такі наукові дисципліни, як теорія організації, теорія систем, кібернетика, синергетика.

Застосування методів управління проєктами, які дозволяють ефективно управляти тимчасовими, витратними, якісними параметрами майбутньої будівельної продукції, безумовно доцільно використовувати в проєктах, пов'язаних з будівельними технологіями, що пояснюється динамікою і складністю.

Результати

Будівельний проєкт функціонує в певному оточенні, що включає внутрішні і зовнішні компоненти, економічні, що враховують, політичні, соціальні, технологічні, нормативні, культурні і інші чинники. У роботах (Гусаков, 2004; Павлов, 2008; Данкевич, 2018) проєкт завжди націлений на результат, на досягнення певної мети.

Кожен проєкт є товаром, який реалізується згідно з умовами і потребами замовника – майбутнього власника. У ринковій економіці замовник (інвестор) – окремо, зацікавлена в реалізації проєкту фізична або юридична особа, яка вкладає в нього свої або позикові кошти і приймає рішення щодо термінів, вартості та якості його реалізації.

Прийняття будь-яких організаційних та управлінських процесів реалізації будівельних проєктів, як правило, пов'язане з низькою факторів, які впливають на хід проєкту. До цих факторів можна віднести: нестабільність у поставках матеріалів і комплектування у будівельному проєкті; невизначеність із фінансуванням;

обмеженість матеріально-технічних ресурсів, трудових ресурсів; недостовірна інформація по постачальникам, термін виконання будівельно-монтажних робіт, тощо. Звичайно, наведені фактори тим чи іншим чином мають вплив на строк реалізацію проекту.

Тому будівельна галузь потребує втілення раціональних реформ, які мають наукову-практичну основу.

Прийняття обґрунтованих надійних ОТР все більшою мірою ґрунтується на наукових підходах. Необхідно використовувати системні підходи до підготовки, обґрунтуванню та вибору організаційно-технологічних рішень, які містять у собі методики для аналізу відповідної інструментальної платформи, що дозволить змодельовати розвиток ситуації й передбачати наслідки. Моделювання організаційно-технологічних рішень та їх системотехнічна оцінка мають вирішальне практичне значення для визначення конкурентоспроможності будівельних проєктів.

В роботах (Тян, Холод, & Ткаченко, 2000; Павлов, & Радкевич, 2003; Гусаков, 2004; Радкевич, & Данкевич, 2011) поняття системотехніка визначено як напрямок науки, який охоплює проєктування, створення, випробування та експлуатацію складних систем технічного і соціально-технічного характеру та є прикладним втіленням теорії систем.

У практиці досліджень теорія систем застосовується з використанням таких методик:

- процедур теорії дослідження операцій, яка дає змогу дати кількісну оцінку об'єктам дослідження;
- аналізу систем дослідження об'єктів в умовах невизначеності;
- системотехніки, яка включає проєктування і синтез складних систем у процесі дослідження їх функціонування.

У ряді досліджень наукових праць вітчизняних і іноземних вчених знайшло своє застосування процедура ухвалення рішень для вирішення структурованих проблем використовуючи методологію системного аналізу, системи підтримки ухвалення рішень (СПУР).

Технологія застосування системного аналізу полягає з процедури ухвалення рішень і включає такі основні етапи:

- побудова моделей для обґрунтування рішень;

- пошук оптимального (допустимого) варіанту рішення;
- узгодження рішення;
- підготовка рішення до реалізації;
- затвердження рішення;
- керування ходом реалізації рішення;
- перевірка ефективності рішення.

Сутність системного аналізу та його методики є аналітичною складовою інструментарію моделювання організаційно-технологічних рішень та проведення системотехнічної оцінки визначення конкурентоспроможності будівельних проєктів.

У теорії систем та системотехніці уведений ряд термінів, серед яких є термін тріади.

З математичної точки зору термін тріада має вигляд (X, A, B, x_0) – трійка така, що $X = A \cup B$ причому $x_0 \in A \cap B$ де X – топологічний простір, $x_0 = \emptyset$ – відчинений пустий елемент, який забезпечує зв'язність.

Але з точки зору будівельного проєкту, під терміном тріади можна розглянути основні напрями будівельних процесів це організаційні, технологічні та економічні рішення (рис. 1).

У реальності реалізація будівельних проєктів потребує концентрацію вибору надійних оптимальних організаційно-технологічних рішень.

Концепція, як зазначено у словнику іноземних слів, є система поглядів, або інше розуміння явищ, процесів.

Концептуальне проєктування як зазначено в роботах (Бушуєв, 1980; Павлов, 2005, Млодецький 2015), це ідентифікація і визначення цілей і завдань проєкту і розробка відповідних документів для задоволення замовника проєкту.



Рис. 1. Термін тріади будівельних процесів

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

В процесі формування концепції максимально точно будується: система цілей (включаючи місію проєкту), структурно-функціональна модель продукту проєкту і модель взаємодії проєкту і його продукту з оточенням.

Концептуальне проєктування включає найбільш раціональний рівень наближення до досягнення цілей проєкту, а також визначення усього необхідного для вирішення поставлених завдань.

Підсумки концептуального проєктування:

- 1) результати концептуального аналізу:
 - причини проблем;
 - очікувані результати;
 - аналіз очікуваного прибутку і вартості (якщо рішення припускає прибуток);
 - час виконання робіт;
 - розглянуті альтернативні організаційно-технологічні рішення (ОТР);
- 2) висновки:
 - проблеми і їх рішення;

- рекомендації та відповідні рішення;
- 3) визначення оцінки надійності;
- 4) визначення межі допустимого ризику (МДР).

Тому розглянувши наукові праці як вітчизняних так і іноземних фахівців, які слугували формуванню нового погляду на концепцію конкурентоспроможності будівельних проєктів.

На нашу думку, концепція конкурентоспроможності будівельних проєктів повинна враховувати можливість обґрунтування, оцінки та вибору системотехнічних та організаційно-технологічних рішень.

Дослідження будівельних проєктів базується на розумінні основної ідеї яка полягає в діяльності щодо управління ресурсами, застосування нових технологій управління, використовуючи сучасний інструментарій (методи, методики, моделі) – все це здійснює людина (експерти), починаючи з давніх часів економічного розвитку суспільства.

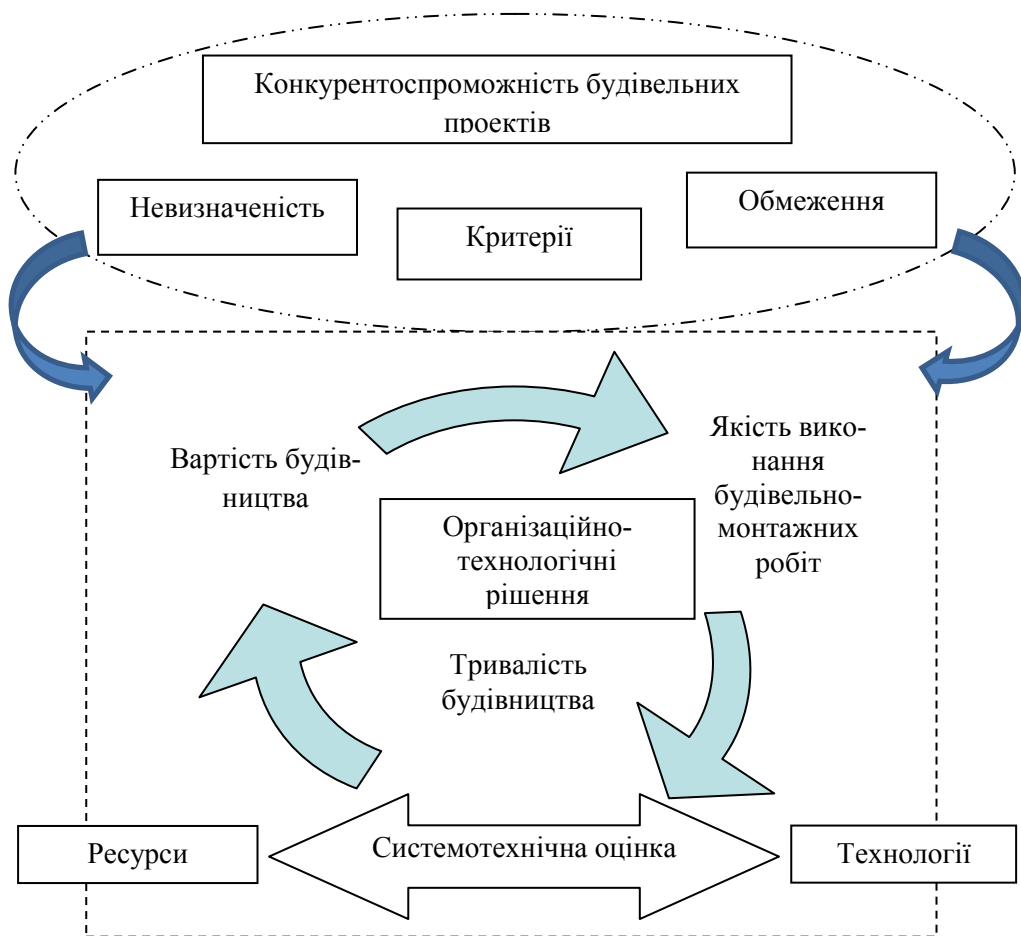


Рис. 2. Концепція конкурентоспроможності будівельних проєктів

© Н. О. Данкевич, 2020

Аналіз наукових праць (Бушуєв, 1980; Млодецький, 2015; Павлов, 2008; Тянь, & Павлов, & Головова, 2006) показав, що застосування концепції управління будівельними проектами є одним з основних напрямів оптимізації організаційно-технологічних рішень забезпечення конкурентної спроможності будівельних проектів в умовах трансформації ринку з використанням принципу системотехніки та інформаційних технологій зведення будівель і споруд. Схематично концепція конкурентоспроможності будівельних проектів представлена на рис. 2.

Дослідження питань вдосконалення технології та організації будівельного виробництва показали, що основною метою є скорочення тривалості будівництва. Залежність зміни вартості виконання робіт від тривалості будівництва і вплив ступеня інтенсивності на тривалість має велике значення, оскільки дає можливість порівняти економічний ефект від скорочення тривалості будівництва з додатковими витратами будівельних організацій.

Велика кількість показників, що впливає на процес формування тривалості, і вартості будівельно-монтажних робіт, таких як: склад технологічних операцій і склад кваліфікаційної або спеціалізованої бригади, кількість будівельних машин і механізмів. У зв'язку з цим в існує велика ймовірність неточності в частині визначення тривалості і витрат на ту чи іншу операцію. Приймаючи до уваги те, що будівельний проєкт складається безліч різноманітних технологічних операцій, тому помилка або прорахунки при визначенні технологічних показників перетворюються в серйозні відхилення за часом і вартістю.

В роботах (Гусаков, 2004; Павлов, & Брехаря, & Радкевич 2005; Павлов, & Радкевич, 2003; Тянь, & Павлов, 2006; Радкевич & Данкевич, 2011; Данкевич, 2020b) визначено, що теоретичною платформою вибору оптимальних ОТР реалізації будівельних проєктів є інструментальний апарат, який повинен бути системним, тобто відноситися не до виконання окремих робіт, а до об'єктів будівництва в цілому; при цьому обґрунтування має здійснюватися на стадії організаційно-технологічної підготовки.

Для обґрунтування організаційно-технологічних рішень реалізації будівельних проєктів передбачається використовувати су-

часні методи теорії графів, тобто сітьове моделювання технологічних процесів, економіко-математичне програмування і програмні продукти.

Додаткового аналізу вимагають питання підвищення інтенсивності виконання технологічних процесів при будівництві за рахунок додаткового збільшення виконавців, змінності, накопичення фронту робіт, що обумовлює створення моделей і методів, які б дозволили оцінити ефективність прийнятих рішень в сукупності їх впливу на критерії тривалості і вартості виконання робіт.

Умови невизначеності, динамічності та багатоваріантний підхід до вирішення завдань оптимізації ОТР, облік дискретного характеру залежності «тривалість-вартість» та інші визначають актуальність їх подальшого удосконалення.

Наукова новизна та практична значимість

Доведено, що проблеми будівельного виробництва суто системотехнічні, всі вони, взаємодоповнюють та взаємообумовлюють одне одного, тому для реалізації і аналізу будівельних проєктів в ринкових умовах необхідно користуватися основними принципами системотехніки які дозволяють всебічно обґрунтовувати рішення об інвестуванні будівельного проєкту.

Висновки

Основним напрямом ефективної діяльності будівельної організації у умовах невизначеності і динамічності середовища є отримання прибутку з дотриманням принципів саморегуляції за рахунок прискорення виконання будівельного проєкту з мінімальними витратами. В цих умовах актуальними є наукові дослідження в області системи моделей і методів які базуватися на сітьових моделях, тип опису яких носить детерміновано-стохастичний характер, що дозволяють проводити багатоваріантний аналіз та обґрунтований вибір оптимального варіанту організаційно-технологічних рішень при виконанні будівельного його в заданий термін з мінімальними витратами.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бушуев, С. Д., Михайлов, В. С. (1980). *Разработка алгоритмов управления строительством*. Киев: Будівельник.
- Голенко, Д. И. (1968). *Статистические методы сетевого планирования и управления*. Москва: Наука.
- Данкевич, Н. О. (2019). Підвищення ефективності організаційних рішень у складі проекту організації будівництва. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 38-43.
- Данкевич, Н. О. (2020a). Визначення оптимальних фінансово-часових параметрів будівельного проекту при оцінці тендерної пропозиції. *Eurasian scientific congress. Abstracts of the 4th International scientific and practical conference*. Barcelona: Barca Academy Publishing, 136-140.
- Данкевич, Н. О. (2020b). Теоретичні аспекти системи управління будівельною організацією в умовах нестійкого ринку. *Public communication in science. Philosophical, cultural, political, economic and its context*, 109-112.
- Млодецький, В. Р., & Ценацевич, Т. О. (2015). Обґрунтування раціонального рівня організаційно-технологічної надійності у будівельних проектах. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 9, 47-54.
- Павлов, І. Д. (2008). *Управління проектами і оптимізація рішень в умовах невизначеності та ризику*. Запоріжжя: ЗДІА.
- Павлов, І. Д., Брехаря, Г. П., & Радкевич, А. В. (2005). *Модели принятия управленческих решений*. Запорожье: ЗНУ.
- Павлов, І. Д., & Радкевич, А. В. (2003). *Оптимальні моделі організації будівельного виробництва*. Запоріжжя: ЗДІА.
- Радкевич, А. В., Арутюнян, І. А., & Данкевич, Н. О. (2017). Аналіз методів і моделей при обґрунтування організаційно-технологічних рішень будівництва об'єктів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 11, 74-80.
- Радкевич, А. В., & Данкевич, Н. О. (2011). Вибір ефективного варіанту організаційно-технологічних рішень будівельного проекту. *Вісник ХНАМГ «Комунальне господарство міст» Сер. Технічні науки та архітектура*, 101, 97-103.
- Радкевич, А. В., Павлов, І. Д., & Данкевич, Н. О. (2018). Огляд сучасних методів і методик оцінки впливу організаційно-технологічних рішень на будівельне виробництво. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 3-10.
- Системотехника в строительстве. (2004). *Энциклопедический словарь* / под ред. А. А. Гусакова. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов.
- Тян, Р. Б., Павлов, І. Д., & Головова, Л. С. (2006). *Управління проектами в виробничих системах*. Запоріжжя: ГУ ЗДМУ.
- Тян, Р. Б., Холод, Б. І., & Ткаченко, В. А. (2000). *Управління проектами*. Дніпропетровськ: Дніпропетровська академія управління бізнесу та права.
- Тугай, А. А. (2008). *Система адаптації організації будівництва до євростандартів* (Автореферат докторської дисертації). Харківський держ. технічний ун-т будівництва та архітектури. Харків.

Н. А. ДАНКЕВИЧ*

*Кафедра «Промышленного и гражданского строительства», Инженерный институт
Запорожского национального университета, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006,
тел. +38 (066) 482 42 78, эл. почта DankevichNatali28@gmail.com, ORCID 0000-0002-7146-9303

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ДИНАМИЧНОСТИ С СОБЛЮДЕНИЕМ ПРИНЦИПА САМОРЕГУЛЯЦИИ

Цель. Исследование системы организации строительства и определения путей повышения организационно-технологической надежности строительного проекта на основе законов системотехники в условиях трансформации экономических отношений строительной отрасли. **Методика.** Важную роль в исследовании играет формирование знаний и умений использования современного проектного подхода к решению задач развития процессов управления организационно-технологическими параметрами на разных уровнях, ориентации этих процессов на достижение конечных результатов с минимальными затратами времени и средств и усвоения методологии управления строительными проектами, как нового прогрессивного инструментария сферы организации строительства. **Результаты.** В работе проведен анализ управленческих процессов реали-

© Н. О. Данкевич, 2020

зации строительных проектов, как правило, связано с низкой факторов, влияющих на ход строительного проекта. Рассмотрены принципы моделирования организационно-технологических решений и их системно-техническая оценка, имеет решающее практическое значение для определения конкурентоспособности строительных проектов в условиях неопределенности и динамичности отечественного строительного сектора. **Научная новизна.** На основе принципов системотехники, а также законов управления проектами определены пути повышения надежности за счет оптимального выбора вариантов организационно-технологических решений, в связи с этим строительная организация решает, какую величину прибыли и с какой вероятностью она согласна понести с учетом разнообразия состояния системы. **Практическая значимость.** Применение концепции управления строительными проектами и использования принципа системотехники является одним из основных направлений оптимизации организационно-технологических решений обеспечения конкурентной способности строительных проектов в условиях трансформации рынка строительных услуг.

Ключевые слова: строительный проект; организационно-технологические решения; системотехника; конкурентоспособность

N. A. DANKEVYCH*

* Department of Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Sobornyi Avenue 226, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (098) 272 90 77, e-mail DankevichNatali28@gmail.com, ORCID 0000-0002-7146-9303

FORMATION OF A SYSTEM FOR SELECTING THE OPTIMAL OPTION OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS UNDER UNCERTAINTY AND DYNAMIC CONDITIONS WITH OBSERVANCE OF THE PRINCIPLE OF SELF-REGULATION

Purpose. Investigation of the construction management system and determination of ways to improve the organizational and technological reliability of a construction project based on the laws of system engineering in the context of the transformation of economic relations in the construction industry. **Methodology.** An important role in the study is played by the formation of knowledge and skills of using a modern design approach to solving the problems of developing management processes for organizational and technological parameters at different levels, orienting these processes towards achieving final results with minimal time and money and mastering the methodology for managing construction projects as a new progressive construction management tools. **Findings.** The paper analyzes the management processes of the implementation of construction projects, as a rule, is associated with low factors affecting the course of a construction project. The principles of modeling organizational and technological solutions and their systematic assessment are considered; it is of decisive practical importance for determining the competitiveness of construction projects in the face of uncertainty and dynamism of the domestic construction sector. **Originality.** On the basis of the principles of systems engineering, as well as the laws of project management, ways of increasing reliability through the optimal choice of options for organizational and technological solutions have been determined, in this regard, the construction organization decides what amount of profit and with what probability it agrees to bear, taking into account the diversity of the state of the system. **Practical value.** The application of the concept of construction project management and the use of the principle of systems engineering is one of the main directions of optimization of organizational and technological solutions to ensure the competitiveness of construction projects in the context of the transformation of the construction services market.

Keywords: construction project; organizational and technological solutions; systems engineering; competitiveness

REFERENCES

- Bushuev, S. D., Mikhaylov, V. S. (1980). *Razrabotka algoritmov upravleniya stroitel'stvom*. Kiev: Budivelnik. (in Russian)
- Golenko, D. I. (1968). *Statisticheskie metody setevogo planirovaniya i upravleniya*. Moskva: Nauka. (in Russian)
- Dankevych, N. O. (2019). Pidvyshchennia efektyvnosti orhanizatsiynykh risheh u skladi proektu orhanizatsii budivnytstva. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 38-43. (in Ukrainian)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Dankevych, N. O. (2020a). Vyznachennia optimalnykh finansovo-chasovykh parametriv budivelnogo proektu pry otsintsi tendernoi propozyitsii. *Eurasian scientific congress. Abstracts of the 4th International scientific and practical conference*. Barcelona: Barca Academy Publishing, 136-140. (in Ukrainian)
- Dankevych, N. O. (2020b). Teoretychni aspekty systemy upravlinnia budivelnou orhanizatsiieiu v umovakh nestiikoho rynku. *Public communication in science. Philosophical, cultural, political, economic and it context*, 109-112. (in Ukrainian)
- Mlodetskyi, V. R., & Tsenatsevykh, T. O. (2015). Obgruntuvannia ratsionalnogo rivnia orhanizatsiino-tekhnologichnoi nadiinosti u budivelnnykh proektakh. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, 9, 47-54. (in Ukrainian)
- Pavlov, I. D. (2008). *Upravlinnia proektamy i optymizatsiia rishen v umovakh nevyznachenosti ta ryzyku*. Zaporizhzhia: ZDIA. (in Ukrainian)
- Pavlov, I. D., Brekharya, G. P., & Radkevich, A. V. (2005). *Modeli prinyatiya upravlencheskikh resheniy*. Zaporozhe: ZNU. (in Russian)
- Pavlov, I. D., & Radkevych, A. V. (2003). *Optymalni modeli orhanizatsii budivelnogo vyrobnytstva*. Zaporizhzhia: ZDIA. (in Ukrainian)
- Radkevych, A. V., Arutiunian, I. A., & Dankevych, N. O. (2017). Analiz metodiv i modelei pry obgruntuvannia orhanizatsiino-tekhnologichnykh rishen budivnytstva obektiv. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 11, 74-80. (in Ukrainian)
- Radkevych, A. V., & Dankevych, N. O. (2011). Vybir efektyvnogo variantu orhanizatsiino-tekhnologichnykh rishen budivelnogo proektu. *Visnyk KhNAMH «Komunalne hospodarstvo mist» Ser. Tekhnichni nauky ta arkhitektura*, 101, 97-103. (in Ukrainian)
- Radkevych, A. V., Pavlov, I. D., & Dankevych, N. O. (2018). Ohliad suchasnykh metodiv i metodyk otsinky vplyvu orhanizatsiino-tekhnologichnykh rishen na budivelne vyrobnytstvo. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 3-10. (in Ukrainian)
- Sistemotekhnika v stroitelstve. (2004). *Entsiklopedicheskiy slovar / pod red. A. A. Gusakova*. Moskva: Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov. (in Russian)
- Tian, R. B., Pavlov, I. D., & Holovkova, L. S. (2006). *Upravlinnia proektamy v vyrobnychyykh systemakh*. Zaporizhzhia: HU ZIDMU. (in Ukrainian)
- Tian, R. B., Kholod, B. I., & Tkachenko, V. A. (2000). *Upravlinnia proektamy*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovska akademiia upravlinnia biznesu ta prava. (in Ukrainian)
- Tuhai, A. A. (2008). *Systema adaptatsii orhanizatsii budivnytstva do yevrostandartiv (Avtoreferat doktorskoi dysertatsii)*. Kharkivskiy derzh. tekhnichniy un-t budivnytstva ta arkhitektury. Kharkiv. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 05.10.2020.

Прийнята до друку 26.10.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21:[625.1:625.141-048.78]

С. М. ДЕМЧЕНКО¹, А. М. КУРГАН², Г. О. ЛИННИК^{3*}

¹ Структурний підрозділ «Дніпровське науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства» філії «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», пл. Вокзальна 11-Ж, м. Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 793 23 60, ел. пошта s.demchenko@dp.uz.gov.ua

² Структурний підрозділ «Дніпровське науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства» філії «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», пл. Вокзальна 11-Ж, м. Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 793 23 47, ел. пошта a.kurgan@dp.uz.gov.ua

^{3*} Департамент колії та споруд АТ «Укрзалізниця», вул. Є. Гедройця, 5, м. Київ, Україна, 03150, тел. +38 (044) 465 03 54, ел. пошта georgiylinnik@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УКЛАДАННЯ БЕЗБАЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА НА ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТАХ

Мета. Удосконалення технології укладання безбаластного мостового полотна на плитах БМП шляхом заміни дерев'яних прокладок на швидкоотвердіючі високоміцні підливні суміші з установкою плит у проектне положення з використанням спеціальних регулюючих пристроїв. **Методика.** Запропонований авторами регулюючий пристрій, що складається з болта типу БР та закладної деталі, яка входить до складу плити безбаластного мостового полотна. Пристрій забезпечує встановлення плити БМП у проектне положення по вертикалі з точністю ± 1 мм та витримує навантаження від власної ваги й рухомого складу, що застосовується під час укладання та рихтовки мостового полотна. Для лабораторних випробувань була розроблена схема і побудований стенд, який дозволяє відповідно до вимог У 7012.02.000 ПМ (2012), здійснювати навантаження на плиту БМП-КРм, встановлену на регулюючі болти типу БР. Навантаження забезпечувалось гідравлічною системою і передавалось на плиту через змонтовані на плиті колійні рейки, прикладалось у двох точках на кожну рейку симетрично відносно поздовжньої вісі. Випробування проводились до руйнування. **Результати.** При навантаженні 137 кН на одну точку сталась втрата стійкості регулюючих болтів типу БР. Використання незнімної опалубки та швидкоотвердіюча безсадочна суміш замість прокладних брусів у взаємодії з болтами регулюючими типу БР. **Наукова новизна.** Вона полягає в отриманні залежностей зусиль від конструкції БМП. **Практична значимість.** Підтверджена відповідність дослідних зразків плит типу БМП-КРм з елементами регулювання їх проектного положення вимогам конструкторської та технічної документації.

Ключові слова: безбаластне мостове полотно; болт регулюючий; регулюючий пристрій; шпилька високоміцна; прокладний шар; швидкоотвердіюча суміш; випробування

Вступ

Сучасне залізничне сполучення неможливо уявити без високих швидкостей як основи інноваційного розвитку залізниць. В даний час на магістралях світу використовуються дві принципово різні конструкції залізничної колії: традиційна залізнична колія на баласті і безбаластна.

Під терміном безбаластна колія поєднується декілька доволі різноманітних конструкційних рішень. Суттєва різниця полягає в конструкції підрейкової основи: це може бути колія на окремих опорах (на шпалах, напівшпалах або спеціальних блоках) та на безперервній основі у вигляді плит.

Особливої уваги в плані еволюції конструкції залізничної колії заслуговує приклад Японії. З огляду на сприятливі топографічні умови, на більшій частині магістралі (54 %) була застосована класична будова залізничної колії – на земляному полотні. Інша ж частина лінії (46 %) розміщувалася на тих чи інших штучних спорудах. На поточне утримання ділянок колії, що була укладена на жорсткій основі, витрати виявилися в 3...5 разів меншими. Ці обставини сприяли тому, що надалі було зроблено вибір на користь жорсткої основи конструкції колії.

Безбаластне мостове полотно на залізобетонних плитах широко застосовують на металевих залізничних мостах (рис. 1) (Ключник, 2017).



Рис. 1. Укладання мостового полотна на плитах БМП

Воно має високу стабільність положення елементів і тривалий термін використання, захищає від забруднення і корозії верхні пояси балок і в'язі між ними, дає можливість замінити мостове полотно на дерев'яних поперечинах без зміни відмітки колії на мосту та підходах, створює безпечний прохід мостом колісних пар у випадку сходу з рейок, є економічним за сумарною вартістю виготовлення, укладання та експлуатації протягом усього терміну служби мосту в порівнянні з типовим мостовим полотном на дерев'яних поперечинах (Марочка, & Бобошко, 2018; Marochka, & Boboshko, 2018).

На залізничних мостах АТ «Укрзалізниця» експлуатується більше 25 км мостового полотна на дерев'яних брусах, які у плановому порядку потребують заміни на залізобетонні плити. Існуюча технологія укладання безбаластного мостового полотна на залізобетонних плитах трудомістка, для реалізації вимагає значних за часом технологічних вікон і тому потребує удосконалення. У теперішній час у якості прокладного шару, через який залізобетонні плити безбаластного мостового полотна (далі – плита БМП) з'єднують з поздовжніми балками прогонової будови мосту використовують прокладки з твердих порід дерева, (переважно дубові) та пластини з гумовокордової транспортерної стрічки товщиною 8...10 мм. Однак, з досвіду експлуатації такої конструкції відомо, що використання дерев'яних прокладок має ряд недоліків: неможливість досягнення проектною точності укладання плит типу БМП (± 1 мм); значні

трудовитрати на виготовлення прокладок, зважаючи на те, що практично кожна прокладка має індивідуальні розміри, потребує відповідного маркування; вимагає значних трудовитрат на підгонку прокладок «по місцю» у місцях зміни товщини верхнього горизонтального листа поздовжніх балок, розміщення «рибок», стикових накладок, заклепок, високоміцних болтів. Крім того, навіть антисептовані прокладки з твердих порід деревини мають проектний термін служба не більше 10...15 років, що втричі менше строку служби плит.

Мета

З урахуванням вище перелічених недоліків, було встановлено, що технологія укладання безбаластного мостового полотна на плитах БМП та конструкція прокладного шару потребує удосконалення. Вирішення вищезазначеної проблеми можливо шляхом заміни дерев'яних прокладок на швидкотвердіючі високоміцні підливні суміші з установкою плит у проектне положення з використанням спеціальних регулюючих пристроїв.

Методика

Роботи щодо удосконалення технології укладання безбаластного мостового полотна на залізничних мостах виконувались у тісній співпраці працівників СП «Дніпровське НКТБ КГ» філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця», філії «Старокостянтинівський завод залізобетонних

шпал» та фахівцями Департаменту колії та споруд АТ «Укрзалізниця».

Для досягнення поставленої мети, на попередньому етапі були визначені основні вимоги до регулюючого пристрою. Встановлено, що такий пристрій повинен:

- відповідати вимогам інструкції ЦП-0137 (2006) та існуючих проєктів укладання плит безбаластного мостового полотна;

- забезпечувати встановлення плити БМП у проєктне положення по вертикалі з точністю ± 1 мм та витримувати навантаження від власної ваги й рухомого складу, що застосовується під час укладання та рихтовки мостового полотна;

- забезпечувати при встановленні плити у проєктне положення зазор між верхом поздовжньої балки та нижньою гранню плити у межах від 20 до 75 мм. Додатково були враховані складність та вартість виготовлення складових частин регулюючого пристрою, його взаємодію з існуючою плитою типу БМП та ін.

Запропонований авторами регулюючий пристрій складається з болта типу БР (далі – болт) (рис. 2) та закладної деталі (рис. 3), яка входить до складу плити безбаластного мостового полотна.

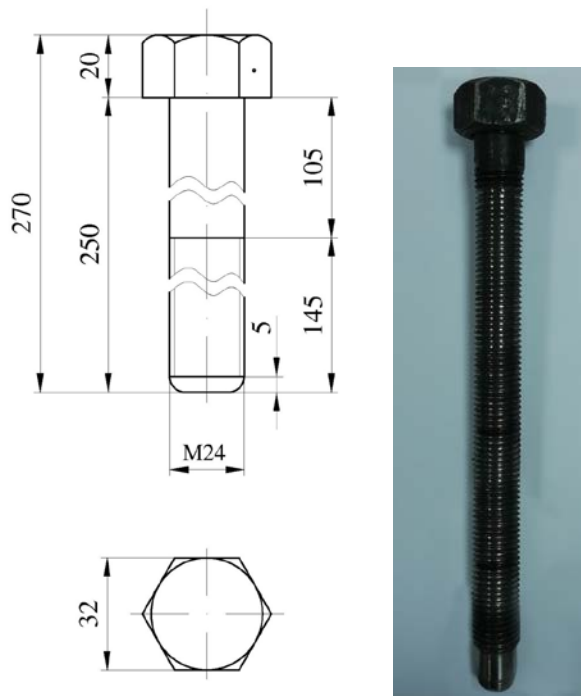


Рис. 2. Болт регулюючий типу БР

Регулюючий болт виготовляють зі сталі 45 за ГОСТ 1050-2013 (2013) довжиною 270 мм,

яка забезпечує можливість встановлення плити у проєктне положення та надає змогу розміщення опалубки для заливки швидкотвердіючої безусадочної суміші.

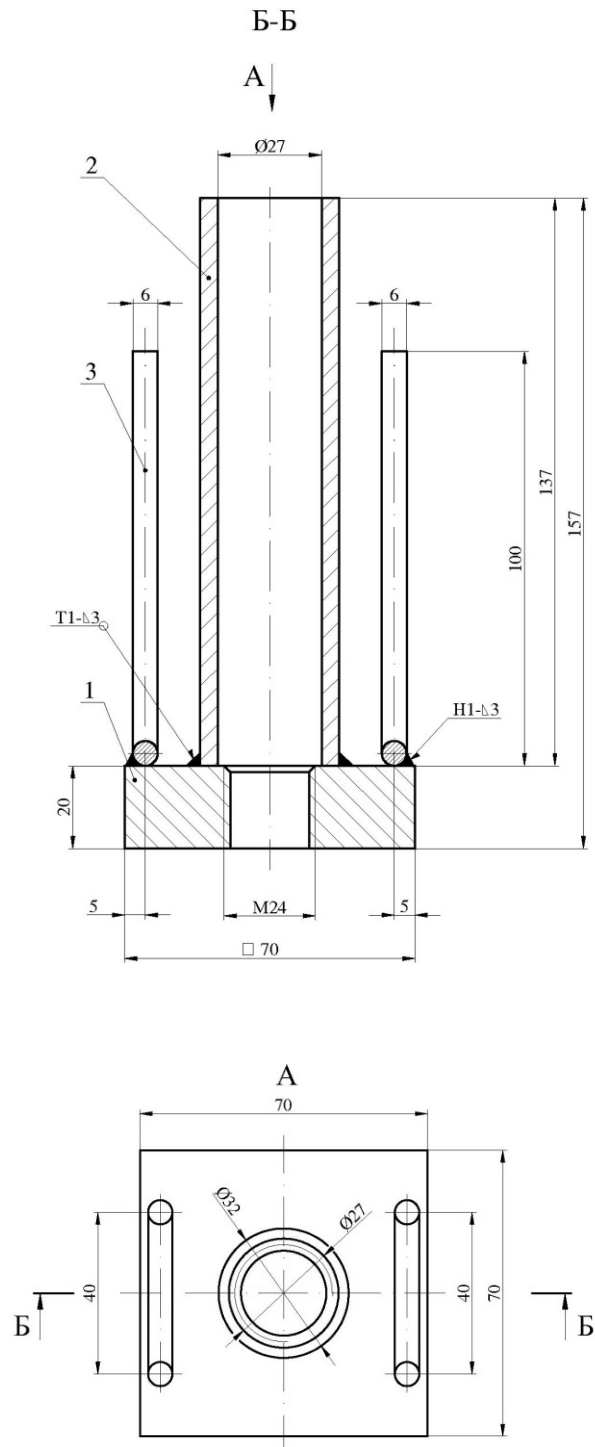


Рис. 3. Закладна деталь:
 1 – шайба опорна; 2 – труба 25×3,5 мм;
 3 – стрижень Ø6 мм

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Загальний вигляд регулюючого пристрою наведено на рис. 4. Застосування регулюючого пристрою призвело до необхідності модернізації існуючого типу плит безбаластного мостового полотна. Під час досліджень за основу взята плита типу БМП-КР, яка на відміну від плити БМП, передбачає використання у якості охоронних пристроїв контруктиків або контррейки типу Р50. Загальний вид плити БМП-КР з контруктиком наведено на рис. 5, а.

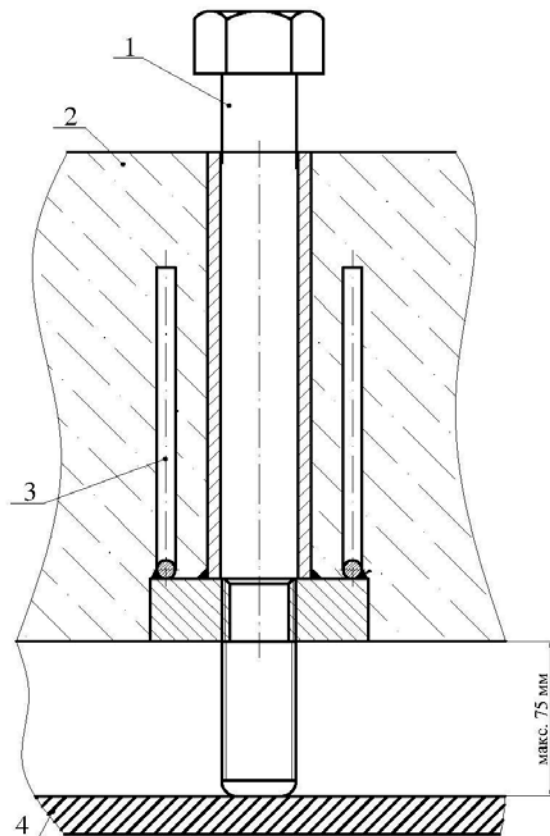


Рис. 4. Регулюючий пристрій:

1 – болт регулюючий типу БР; 2 – плита БМП;
3 – опора закладна; 4 – балка

Після виконання проектних робіт щодо розміщення закладної деталі в тілі плити БМП-КР, була розроблена модернізована плита БМП-КРм (далі – модернізована плита або зразок) (ДБН В.2.3-14:2006, 2006).

Загальний вид модернізованої плити наведено на рисунку 5, б. Кількість та розміщення регулюючих пристроїв на одній модернізованій плиті залежить від її типорозміру: від 4-х до 6-ти.

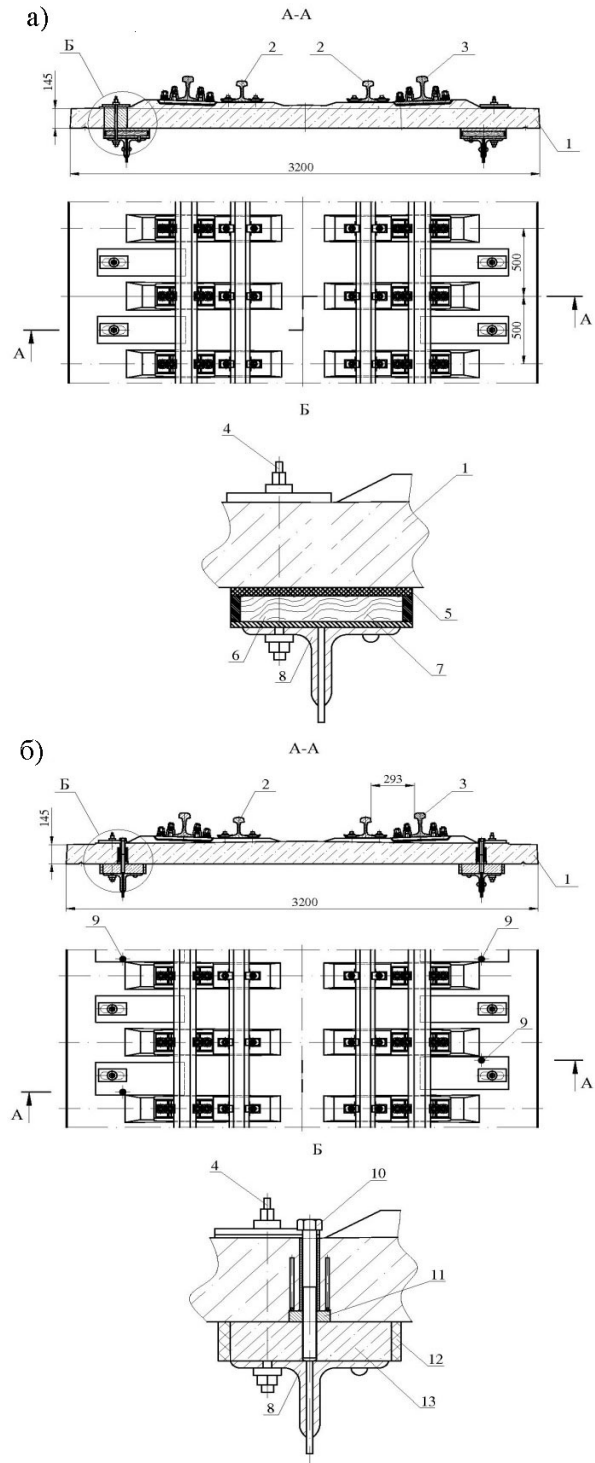


Рис. 5. Плита типу БМП-КР (а) та БМП-КРм (б):

1 – безбаластна залізобетонна плита; 2 – контруктик;
3 – рейка зі скріпленням; 4 – високоміцна шпилька кріплення плити; 5 – гума; 6 – дерев'яна опорна прокладка;
7 – прокладний шар; 8 – поздовжня балка; 9 – отвори під болти БР; 10 – болт типу БР; 11 – закладна деталь;
12 – незнімна опалубка зі спіненого поліетилену;
13 – прокладний шар MinobondHF

Результати

Для перевірки працездатності плит БМП-КРМ й регулюючих пристроїв були проведені лабораторні й заводські випробування.

Лабораторні випробування проводились на базі філії «Старокостянтинівський завод залізобетонних шпал» відповідно до програми та методики лабораторних випробувань У 7012.02.000 ПМ (2012).

Для лабораторних випробувань була розроблена схема (рис. 6, а) і побудований стенд (рис. 6, б), який дозволяє відповідно до вимог У 7012.02.000 ПМ (2012), здійснювати навантаження на плиту БМП-КРМ, встановлену на регулюючі болти типу БР.

Випробування відбувались наступним чином. Пливу БМП-КРМ було встановлено на випробувальний стенд. Плита опиралась на поздовжні балки через регулюючі болти, вкручені до упору, що забезпечувало максимальний зазор між плитою і поздовжньою балкою. Розрахункове навантаження на одну точку становило 120 кН.

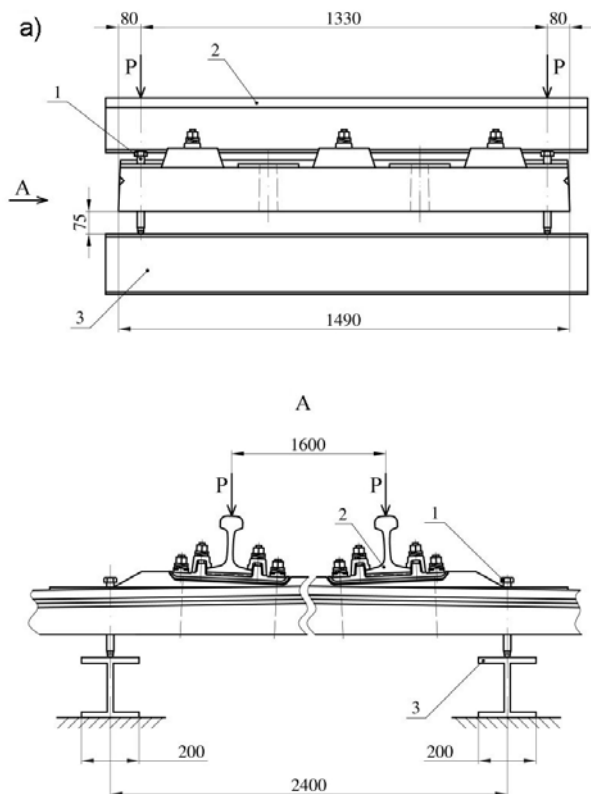


Рис. 6,а. Схема навантаження плити типу БМП-КРМ:
1 – болт регулюючий, 2 – рейка типу Р65,
3 – металева балка; Р – розрахункове навантаження

б)



Рис. 6, б. Стенд для навантаження плити:
1 – болт регулюючий, 2 – рейка типу Р65,
3 – металева балка; Р – розрахункове навантаження



Рис. 7. Втрата стійкості високоміцних шпильок та болтів регулюючих типу БР

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Навантаження забезпечувалось гідравлічною системою і передавалось на плиту через змонтовані на плиті колійні рейки, прикладалось у двох точках на кожну рейку симетрично відносно поздовжньої вісі (рис. 6). Випробування проводились до руйнування. При навантаженні 137 кН на одну точку сталась втрата стійкості регулюючих болтів типу БР (без руйнування бетону на поверхні плити, рис. 7).

Використання незнімної опалубки та швидкотвердіючої безусадочної суміші замість прокладних брусів у взаємодії з болтами регулюючими типу БР

Конструкція опалубки, а найголовніше якісні характеристики прокладного шару впливають на вузол кріплення залізобетонних плит до сталюї балки прогонової будови (Закора, Ключник, Линник, & ін., 2011; Пługін, Мірошніченко, Забіяка, Линник, & Бабенко, 2009), на можливість використовувати приварні шпильки під час організації робіт із заміни мостового полотна, коли час у «вікно» має обмеження.

Під час роботи були взяті до уваги результати натурних та чисельних досліджень напружено-деформованого стану шпильки кріплення плит мостового полотна з врахуванням різних типів прокладного шару, за якими величину навантаження, яке діє на приварну шпильку, можна суттєво зменшити шляхом збільшення жорсткості прокладного шару, тобто за допомогою застосування безусадочних швидкотвердіючих сумішей (Линник, 2010).

З огляду на необхідність скорочення тривалості технологічних «вікон» на виконання робіт з монтажу плит БМП та забезпечення довговічності, міцності прокладного шару були визначені наступні технічні вимоги до швидкотвердіючої безусадочної суміші: міцність на стиск через 2 години не менше 8 МПа; міцність на стиск через 24 години – 20 МПа; міцність на стиск через 28 діб – 60 МПа; усадка через 56 діб < 0,1 %; термін служби не менше 40 років; бути водонепроникним; морозостійкість не менше F 200; відповідати вимогам з тріщиностійкості на протязі всього строку експлуатації. При проведенні випробувань використовувались полімерцементні розчини Minotor 60, Minobond, Minobond HF, які заливались в зазор між плитою і поздовжньою балкою через отво-

ри для високоміцних шпильок – (рисунок 9). Крім того, при проведенні лабораторних випробувань визначалась можливість використання незнімної опалубки зі спіненого поліетилену, товщиною $B_{\min} = 160$ мм (рис. 8).

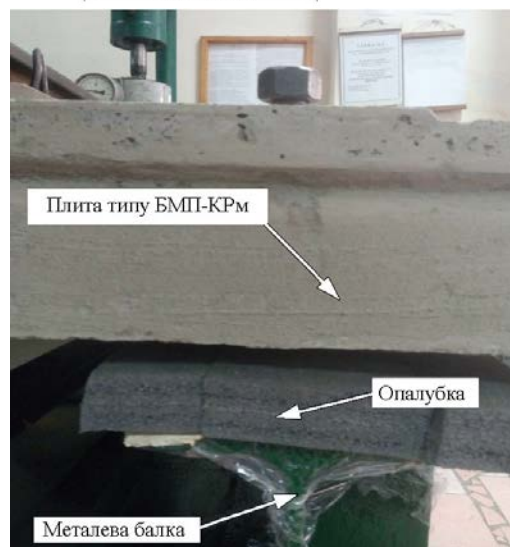
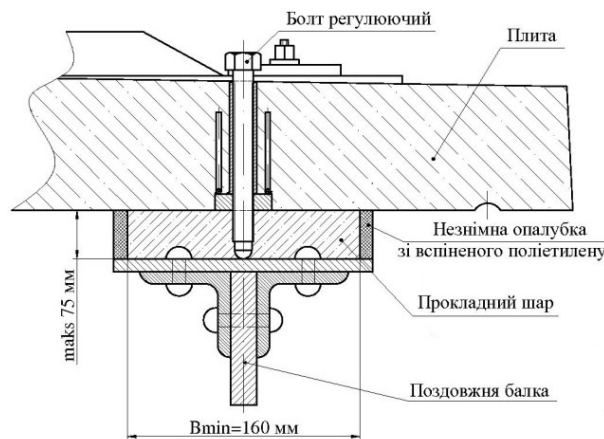


Рис. 8. Незнімна опалубка



Рис. 9. Заливка швидкотвердіючої безусадочної суміші під час лабораторних випробувань

За результатами випробувань оптимальним для використання визначено полімерцементний розчин – Minobond HF, який протягом 2-х годин набрав міцність 7,6 МПа при температурі навколишнього середовища +14°, що практично відповідає нормативній міцності – 8 МПа при температурі навколишнього середовища +30°.

Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, заводські випробування проведени згідно з У 7012.02.000 ПМ1 (2012), підтвердили відповідність дослідних зразків плит виробництва філії «Старокосянтинівський завод залізобетонних шпал» типу БМП-КРм з елементами регулювання їх проектного положення вимогам конструкторської та технічної документації.

Висновки

1. Вузол регулювання положення в профілі плит безбаластного постового полотна витримав лабораторні та заводські випробування і забезпечує регулювання товщини прокладного шару до 75 мм.
2. Незнімна опалубка з спіненого поліетилену забезпечує влаштування прокладного шару товщиною 25...75 мм, надійно утримує швидкотвердіючу безусадочну суміш Minobond HF під час заливки та набору міцності.
3. Застосування плит БМП-КРм разом з незнімною опалубкою з спіненого поліетилену значно скорочує трудовитрати з влаштування безбаластного мостового полотна на залізобетонних плитах а використання у якості прокладного шару швидкотвердіючої безусадочної суміші Minobond-HF дозволяє виключити з конструкції мостового полотна недовговічні елементи з деревини, забезпечити проектний термін експлуатації прокладного шару рівний проектному терміну експлуатації плит.
4. Результати лабораторних та заводських випробувань доцільно врахувати при розробці рекомендацій щодо удосконалення технології укладання безбаластного мостового полотна із застосуванням елементів регулювання проектного положення плит.
5. Для остаточної розробки конструкції мостового полотна на залізобетонних плитах типу БМП-КРм з застосуванням регулюючих пристроїв та технології їх укладання доцільно про-

вести їх дослідні експлуатаційні випробування та дослідну експлуатацію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Marochka, V. V., & Boboshko, S. H. (2018). Analysis of the problems of sections with the transitional rigidity indicator in world bridging. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 82-92.
- ГОСТ 1050-2013 (2013). Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия (с поправкой). Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации.
- ДБН В.2.3-14:2006 (2006). Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. Київ: Мін.буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва.
- Закора, О. Л., Ключник, С. В., Линник, Г. О. & ін. (2011). Напружено-деформований стан залізобетонної плити безбаластного мостового полотна. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, 39, 47-50.
- Ключник, С. В. (2017). Аналіз сучасного стану металевих прогонових будов. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 29-40.
- Линник, Г. О. (2010). Дослідження місцевих деформацій бетонного прокладного шару при використанні мостового полотна на плитах БМП. *Теорія і практика будівництва*, 293-296.
- Марочка, В. В., & Бобошко, С. Г. (2018). Современные методы реконструкции мостовых сооружений. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 14, 15-21.
- Плугін, А. А., Мірошніченко, С. В., Забіяка, О. А., Линник, Г. О., & Бабенко, А. І. (2009). Систематизація пошкоджень залізобетонних плит безбаластного мостового полотна залізничних мостів. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*, 109, 120-130.
- У 7012.02.000 ПМ (2012). Плити залізобетонні безбаластного мостового полотна залізничних мостів з елементами регулювання їх проектного положення. Програма та методика лабораторних випробувань дослідних зразків : Дніпропетровськ: СП «ДНКТБ КГ» філії «НДКТІ» ПАТ «Укрзалізниця».
- У 7012.02.000 ПМ1 (2012). Плити залізобетонні безбаластного мостового полотна залізничних мостів з елементами регулювання їх проектного положення. Програма та методика попередніх (заводських) випробувань дослідної партії : Дніпропетровськ: СП «ДНКТБ КГ» філії «НДКТІ» ПАТ «Укрзалізниця».
- ЦП-0137 (2006). Інструкція з укладання та експлуатації безбаластного мостового полотна (БМП) на залізобетонних плитах. Харків: УкрДАЗТ.

С. Н. ДЕМЧЕНКО¹, А. Н. КУРГАН², Г. О. ЛИННИК^{3*}

¹ Структурное подразделение «Днепровское научно-конструкторское технологическое бюро путевого хозяйства» филиала «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт железнодорожного транспорта» АО «Укрзалізниця», пл. Вокзальна 11-Ж., Днепр, Украина, 49000, тел. +38 (056) 793 23 60, эл. почта s.demchenko@dp.uz.gov.ua

² Структурное подразделение «Днепровское научно-конструкторское технологическое бюро путевого хозяйства» филиала «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт железнодорожного транспорта» АО «Укрзалізниця», пл. Вокзальна 11-Ж., Днепр, Украина, 49000, тел. +38 (056) 793 23 47, эл. почта a.kurgan@dp.uz.gov.ua

^{3*} Департамент пути и сооружений АО «Укрзалізниця», ул. Е. Гедройца, 5, г. Киев, Украина, 03150, тел. +38 (044) 465 03 54, эл. почта georgiylinnik@gmail.com

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УКЛАДКИ БЕЗБАЛЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТАХ

Цель. Совершенствование технологии укладки безбалластного мостового полотна на плитах БМП путем замены деревянных прокладок на быстротвердеющие высокопрочные подливные смеси с установкой плит в проектное положение с использованием специальных регулирующих устройств. **Методика.** Предложенное авторами регулирующее устройство, состоящее из болта типа БР и закладной детали, которая входит в состав плиты безбалластного мостового полотна. Устройство обеспечивает установление плиты БМП в проектное положение по вертикали с точностью ± 1 мм и выдерживает нагрузку от собственного веса и подвижного состава, применяющегося при заключении и рихтовки мостового полотна. Для лабораторных испытаний была разработана схема и построен стенд, который позволяет в соответствии с требованиями У 7012.02.000 ПМ (2012), осуществлять нагрузку на плиту БМП-КРм, установленную на регулирующие болты типа БР. Нагрузка обеспечивалась гидравлической системой и передавалась на плиту через смонтированные на плите путевые рельсы, прикладывалась в двух точках на каждый рельс симметрично относительно продольной оси. Испытания проводились до разрушения. **Результаты.** При нагрузке 137 кН на одну точку произошла потеря устойчивости регулирующих болтов типа БР. Использована несъемная опалубка и быстротвердеющая безусадочная смесь вместо прокладочных брусков во взаимодействии с болтами регулирующими типа БР. **Научная новизна.** Она заключается в получении зависимостей усилий от конструкции БМП. **Практическая значимость.** Подтверждено соответствие опытных образцов плит типа БМП-КРм с элементами регулирования их проектных положением требованиям конструкторской и технической документации.

Ключевые слова: безбалластное мостовое полотно; болт регулирующий; регулирующее устройство; шпилька высокопрочная; прокладочный слой; быстротвердеющая смесь; испытания

S. M. DEMCHENKO¹, A. M. KURGAN², G. O. LYNNYIK^{3*}

¹ Subdivision "Dnipro Research and Design Technological Bureau of Railway Economy" branch of the Research and Design Institute of Railway Transport of JSC Ukrzaliznytsia, pl. Station, 11-Zh, Dnepr, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 793 23 60, e-mail s.demchenko@dp.uz.gov.ua

² Subdivision "Dnipro Research and Design Technological Bureau of Railway Economy" branch of the Research and Design Institute of Railway Transport of JSC Ukrzaliznytsia, pl. Station, 11-Zh, m. Dnepr, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 793 23 47, e-mail a.kurgan@dp.uz.gov.ua

^{3*} Department of Tracks and Structures of JSC "Ukrzaliznytsia", st. E. Giedroyc, 5, Kyiv, Ukraine, 03150, tel. +38 (044) 465 03 54, e-mail georgiylinnik@gmail.com

IMPROVEMENT OF LAYING TECHNOLOGY OF BALLASTLESS BRIDGE DECK ON RAILWAY BRIDGES

Purpose. Improvement of the technology of laying a ballastless bridge deck on BMP slabs by replacing wooden gaskets with fast-hardening high-strength pouring mixtures with the installation of the slabs in the design position

using special control devices. **Methodology.** A regulating device proposed by the authors, consisting of a BR-type bolt and an embedded part, which is part of the slab of a ballastless bridge deck. The device ensures the installation of the BMP slab in the design position vertically with an accuracy of ± 1 mm and withstands the load from its own weight and the rolling stock used in the laying and straightening of the bridge deck. For laboratory tests, a scheme was developed and a stand was built, which allows, in accordance with the requirements of U 7012.02.000 PM (2012), to carry out the load on the BMP-KRm plate installed on the regulating bolts of the BR type. The load was provided by a hydraulic system and transmitted to the plate through track rails mounted on the plate, applied at two points on each rail symmetrically about the longitudinal axis. The tests were carried out until failure. **Results.** With a load of 137 kN per point, there was a loss of stability of control bolts of the BR type. A fixed formwork and a fast-hardening non-shrinking mixture were used instead of spacers in cooperation with regulating bolts of the BR type. **Originality.** It consists of obtaining the dependences of forces on the design of the BMP. **Practical value.** The accordance of prototypes of plates of the BMP-KRm type with elements of regulation of their design position to the requirements of design and technical documentation was confirmed.

Keywords: ballastless bridge deck; control bolt; regulating device; high-strength hairpin; interlayer; fast hardening mixture; trials

REFERENCES

- Marochka, V. V., & Boboshko, S. H. (2018). Analysis of the problems of sections with the transitional rigidity indicator in world bridging. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 82-92. (in English)
- GOST 1050-2013 (2013). Metalloproduksiya iz nelegirovannykh konstruktsionnykh kachestvennykh i spetsialnykh staley. Obshchie tekhnicheskie usloviya (s popravkoy). Moskva: Mezghosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. (in Russian)
- DBN V.2.3-14:2006 (2006). Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannia. Kyiv: Min.bud., arkhitekt. ta zhytl.-komun. hosp.-va. (in Ukrainian)
- Zakora, O. L., Kliuchnyk, S. V., Lynnyk, H. O. & in. (2011). Napruzhenno-deformovanyi stan zalizobetonnoi plyty bezbalastnoho mostovoho polotna. *Visn. Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana*, 39, 47-50. (in Ukrainian)
- Kliuchnyk, S. V. (2017). Analiz suchasnoho stanu metalevykh prohonovykh budov. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 29-40. (in Ukrainian)
- Lynnyk, H. O. (2010). Doslidzhennia mistsevykh deformatsii betonnoho prokladnoho sharu pry vykorystannia mostovoho polotna na plytakh BMP. *Teoriia i praktyka budivnytstva*, 293-296. (in Ukrainian)
- Marochka, V. V., & Boboshko, S. G. (2018). Sovremennye metody rekonstruktsii mostovykh sooruzheniy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 14, 15-21. (in Russian)
- Pluhin, A. A., Miroshnichenko, S. V., Zabiika, O. A., Lynnyk, H. O., & Babenko, A. I. (2009). Systematyzatsiia poskodzhen zalizobetonnykh plyt bezbalastnoho mostovoho polotna zaliznychnykh mostiv. *Zb. nauk. prats UkrDAZT*, 109, 120-130. (in Ukrainian)
- U 7012.02.000 PM (2012). Plyty zalizobetonni bezbalastnoho mostovoho polotna zaliznychnykh mostiv z elementamy rehuliuвання yikh proektnoho polozhennia. Prohrama ta metodyka laboratornykh vyprobuvan doslidnykh zrazkiv : Dnipropetrovsk: SP «DNKTB KH» filii «NDKTI» PAT «Ukrzaliznytsia». (in Ukrainian)
- U 7012.02.000 PM1 (2012). Plyty zalizobetonni bezbalastnoho mostovoho polotna zaliznychnykh mostiv z elementamy rehuliuвання yikh proektnoho polozhennia. Prohrama ta metodyka poperednykh (zavodskykh) vyprobuvan doslidnoi partii : Dnipropetrovsk: SP «DNKTB KH» filii «NDKTI» PAT «Ukrzaliznytsia». (in Ukrainian)
- TsP-0137 (2006). Instruksiiia z ukladannia ta ekspluatatsii bezbalastnoho mostovoho polotna (BMP) na zalizobetonnykh plytakh. Kharkiv: UkrDAZT. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 11.09.2020.

Прийнята до друку 26.10.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21:519.87

К. О. ЖУНЕВ*

*Кафедра «Мосты», Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, Новосибирск, Россия, 630049, эл. почта junev.kirill@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0539-2619

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Цель. На основании экспериментально-теоретических исследований особенностей работы сварных соединений железнодорожных пролетных строений, подверженных образованию наиболее распространенных трещин, усовершенствовать инженерную методику по оценке усталостного ресурса таких конструкций. **Методика.** Оценка усталостного ресурса элемента конструкции выполняется в зависимости от вероятности безотказной работы соединения, при которой расчетный ресурс больше фактической наработки. Определение расчетного ресурса и наработки сварных соединений основано на гипотезе линейного суммирования повреждений. Мерой ресурса и наработки служат накопленные повреждения, вызываемые воздействием эталонного поезда. Величина повреждения зависит от напряжений цикла и кривой усталости типового сварного соединения. Определение циклов напряжений, действующих в элементе конструкции при проходе поезда, основано на аппарате линий влияния. Фактическую наработку соединения вычисляют путем математического моделирования грузопотока за весь период эксплуатации сооружения. **Результаты.** Описана методика, позволяющая выполнять оценку усталостного ресурса с учетом конструктивных особенностей пролетного строения и параметров его эксплуатации. **Научная новизна.** На основании численного моделирования работы стенки балки около верхнего обрыва сварного шва вертикального ребра жесткости обосновано влияние зазора между верхним поясом и торцом вертикального ребра жесткости на величину напряжений в стенке балки, сформированы правила для построения линий влияния изгибающего момента, получена формула для определения напряжений в стенке балки при проходе подвижной нагрузки. Получены степенные уравнения для описания кривых усталости типовых сварных соединений в зависимости от вероятности разрушения соединения. **Практическая значимость.** Предложена стохастическая модель прогноза усталостного ресурса типовых болто-сварных пролетных строений железнодорожных мостов, учитывающая конструктивные особенности пролетного строения и параметры его эксплуатации.

Ключевые слова: железнодорожный мост; сварное пролетное строение; усталостная трещина; остаточный ресурс; наработка; метод расчета; транспортный поток; математическая модель

Введение

Проблема образования усталостных трещин в сварных швах железнодорожных пролетных строений после непродолжительного периода эксплуатации известна давно, и остается актуальной во многих странах (Ключник, 2017), (Bowman, Fu, Zhou, Connor, & Godbole, 2012; Бокарев, Усольцев, & Служаев, 2019). В последние годы на сети железных дорог России отмечают существенный рост количества усталостных трещин в типовых болто-сварных пролетных строениях (Бокарев, Усольцев, & Служаев, 2019). Особенно широкое распространение получили трещины в стенках главных и продольных балок у верхних и нижних концов сварных швов, прикрепляющих вертикальные ребра жесткости. Очевидно, что в условиях

прогрессирующего трещинообразования необходим инструмент прогнозирования срока безопасной эксплуатации сооружения для усиления контроля над ним или планирования ремонтных работ.

Для решения этой задачи еще в 90-х годах прошлого века такими институтами, как НИИЖТ (СГУПС), МИИТ, ИЭС им. Е. О. Патона, ВНИИЖТ, были предприняты совместные исследования долговечности сварных соединений. Несмотря на то, что в исследованиях принимали участие институты преимущественно железнодорожной направленности, результатом работы стали методические указания для расчета на усталость сварных соединений конструкций машин и сооружений промышленно-гражданского комплекса (РД 50-694-90, 1991). Применение этой методики для расчета ресурса

сварных соединений железнодорожных пролетных строений требует существенных корректировок и дополнений, поскольку режим эксплуатации таких конструкций довольно специфичен. Кроме того, имеющийся набор кривых усталости (диаграмм Вёлера) нуждается в дополнении кривыми, полученными в результате испытания образцов при действии изгибающего момента, поскольку трещины, наиболее распространенные в болто-сварных пролетных строениях (тип Т-9, Т-10), образуются в результате изгибных деформаций, а имеющиеся кривые усталости получены в результате испытаний соединений при действии растяжения-сжатия.

Известны современные исследования (Мальгин, & Кириян, 2011; Медведев, & Мальгин, 2014), в которых авторами были показаны особенности работы стенок балок у верхних концов швов вертикальных ребер жесткости и сформулированы рекомендации по уточнению их расчетного ресурса с применением численного моделирования. В качестве недостатков предлагаемой методики следует отметить отсутствие механизма достоверного определения наработки соединения и высокие трудозатраты, связанные с построением трехмерной расчетной модели для определения локальных напряжений.

Исследования авторов (Melaku, & Jung, 2017; Fueki, & Takahashi, 2018) также направлены на прогнозирование усталостной долговечности сварных соединений при помощи численного моделирования. Однако предлагаемые расчетные модели учитывали не только особенности нагружения конструкции и геометрию сварного шва, но и остаточные напряжения от сварки. Применение таких инструментов несомненно ведет к уточнению величины ресурса соединения, но вместе с тем существенно усложняет достижение результата.

Цель

На основании экспериментально-теоретических исследований особенностей работы сварных соединений железнодорожных пролетных строений, подверженных образованию наиболее распространенных трещин, усовершенствовать инженерную методику по оценке усталостного ресурса таких конструкций.

Методика

Оценка усталостной долговечности сварного пролетного строения сводится к определению расчетного ресурса и наработки сварных соединений при заданной вероятности безотказной работы. Мерой усталостного ресурса и наработки элементов железнодорожных мостов служат относительные накопленные повреждения, вызываемые воздействием эталонного поезда. В качестве эталонного поезда принят набор подвижных единиц, состоящих из локомотива ВЛ-80 и полногрузных четырехосных вагонов, общей длиной состава 750 м. Схемы подвижных единиц эталонного поезда приведены на рисунке 1. Основным требованием к выбору эталонного поезда являлась его достаточная «тяжесть» для того, чтобы оказывать усталостное воздействие на элементы мостов, а также «узнаваемость» в виде набора подвижных единиц, которые обращаются и будут обращаться в обозримой перспективе на сети железных дорог.

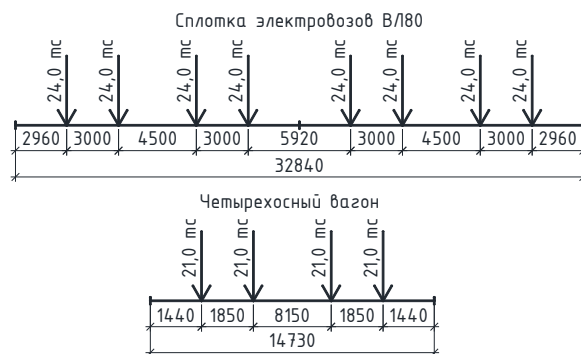


Рис. 1. Схемы подвижных единиц эталонного поезда

В качестве единицы измерения усталостного ресурса элемента пролетного строения принята величина обратная повреждению от эталонного поезда:

$$N_p = \frac{1}{v_g}, \quad (1)$$

где v_g – повреждение, вызванное прохождением по пролетному строению одного эталонного поезда.

Накопленное повреждение от совокупности циклов изменения напряжений при проходе поезда определяют на основании гипотезы линейного суммирования накопленных усталостных повреждений по формуле Пальмгрена-Майнера (Серенсен, 1985).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Согласно этой гипотезе, мерой усталостного повреждения является отношение числа циклов нагружения к числу циклов до разрушения при заданном уровне циклических напряжений:

$$v = \sum_j \frac{n_j}{N_j}, \quad (2)$$

где j – индекс уровня максимальных напряжений цикла σ_j ; n_j – число циклов данного уровня; N_j – предельное число циклов до разрушения, принимаемое по кривым усталости.

В качестве расчетных кривых были приняты кривые усталости 3а, 4а, 5б и 6а, приведенные в методических указаниях (РД 50-694-90, 1991), и кривая усталости 9а, полученная при лабораторных испытаниях сварных образцов при действии изгибающего момента (Жунев, Мурованный, & Яшнов, 2020). В таблице 1 приведено описание сварных соединений и соответствующих им кривых усталости.

Таблица 1

Описание соединений и соответствующих кривых усталости	
Описание сварного соединения	Номер кривой усталости
Швы сплавления верхнего поясного шва со стенкой балки	3а
Швы прикрепления вертикальных ребер жесткости к верхним поясам балок	4а
Швы прикрепления горизонтальных ребер жесткости к вертикальным	5б
Швы прикрепления связей или фасонки	6а
Швы прикрепления вертикальных и горизонтальных ребер жесткости к стенке балки	9а

Уравнение (3), аппроксимирующее кривые усталости из методических указаний, было преобразовано к виду (4), аппроксимирующему кривую усталости, полученную в результате лабораторных испытаний образцов на изгиб при вероятности разрушения $P = 0,50$.

$$N = \frac{A}{\ln \left[\frac{2\sigma_a}{(1-\rho)R_\rho} \right]} - B, \quad (3)$$

где σ_a – амплитуда напряжения цикла, МПа; ρ – коэффициент асимметрии цикла; R_ρ – расчетное сопротивление усталости, МПа; A и B – коэффициенты, определяемые в зависимости от группы соединения и асимметрии цикла напряжений.

$$N = \left(\frac{C}{\sigma_{\max}(1-\rho)} \right)^m, \quad (4)$$

где C , m – эмпирические коэффициенты кривой усталости (таблица 2); $\sigma_{\max}$ – максимальные напряжения цикла, МПа.

Таблица 2

Характеристики кривых усталости

Номер кривой	S_0 , МПа	Коэффициенты	
		m	C
3а	24	7,25	1107
4а	20	5,52	1848
5б	24	5,71	1994
6а	12	4,83	1411
9а	6	3,82	2562

Стоит отметить, что преобразование уравнения (3) к виду (4) приводит к погрешности определения напряжений не более 10%, но существенно упрощает расчет предельного количества циклов. Сравнение результатов определения напряжений для одной кривой, но с использованием разных уравнений ее описывающих, приведено в таблице 3.

Для учета вероятности отклонения предела выносливости типового соединения от среднего значения, формула (4) преобразована к следующему виду:

$$N = \left(\frac{C}{(\sigma_{\max} + z_p S_\rho)(1-\rho)} \right)^m, \quad (5)$$

где z_p – квантиль нормального распределения вероятности (таблица 5); S_ρ – среднеквадратическое отклонение предела выносливости в зависимости от ρ , МПа, определяется по формуле (6):

$$S_{\rho} = \frac{S_0}{1 - \rho}, \quad (6)$$

где S_0 – среднее квадратическое отклонение предела выносливости при $\rho = 0$, МПа, (табл. 2).

Таблица 3

Результаты определения напряжений по двум формулам, описывающим кривую усталости 5б

Кол-во циклов, $\cdot 10^3$	Максимальные напряжения цикла, МПа			Средняя погрешность
	$\rho = -0,4$	$\rho = 0,0$	$\rho = +0,4$	
250	<u>179,7</u> 163,1	<u>245,1</u> 228,3	<u>366,1</u> 380,5	5%
500	<u>149,9</u> 144,1	<u>205,8</u> 201,8	<u>319,5</u> 336,3	0%
1000	<u>124,7</u> 127,4	<u>172,3</u> 178,4	<u>276,2</u> 297,3	4%
2000	<u>107,5</u> 112,6	<u>149,3</u> 157,7	<u>244,1</u> 262,8	6%
5000	<u>95,0</u> 95,7	<u>132,6</u> 133,9	<u>219,4</u> 223,2	1%
10000	<u>90,5</u> 84,6	<u>126,4</u> 118,4	<u>210,0</u> 197,3	7%

Примечание: значения над чертой определены по формуле (3), под чертой – по формуле (4).

Для получения совокупности циклов напряжений при проходе эталонного поезда следует реализовывать его «прокатку» по линии влияния усилия в сварном соединении. Построение линии влияния в рассматриваемом соединении следует выполнять в результате численного моделирования его работы в составе пролетного строения. Полученную последовательность циклов изменения напряжений при проходе нагрузки схематизируют по методу падающего дождя, позволяющему выделять как основные, так и наложенные циклы. Стоит отметить, что данный метод широко используется исследователями (Федорченко & Новиков, 2013; Гадолина, Козлов, Монахова, & Серебрякова, 2019), которые занимаются проблемой долговечности.

Например, для определения линии влияния изгибающего момента в стенке балки на уровне верхнего обрыва сварного шва вертикального ребра жесткости (место развития трещин Т-9) были смоделированы пролетные строения с

разными геометрическими характеристиками сечения. Анализ полученных данных позволил определить общие зависимости и сформировать правила для построения линий влияния изгибающего момента в стенке балки: такая линия влияния является криволинейной и однозначной, длина ее ограничена длиной соседних отсеков балки. Для применения в инженерных расчетах, реальные криволинейные линии влияния были заменены треугольными без потери площади (рисунок 2).

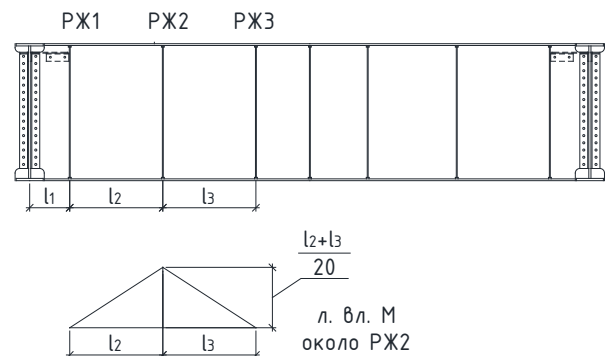


Рис. 2. Линия влияния изгибающего момента в стенке балки на уровне верхнего обрыва сварного шва вертикального ребра жесткости

На основании анализа напряженно-деформированного состояния таких соединений была получена формула для определения напряжений:

$$\sigma = k_z \frac{F_{ys}}{W}, \quad (7)$$

где k_z – коэффициент, отражающий влияние плотности опирания пояса балки на торец ребра жесткости и определяемый по таблице 4; F – часть осевого давления подвижной нагрузки, приходящейся на одну балку; y – ордината линии влияния; s – расстояние от оси балки до места приложения осевого давления подвижной нагрузки (рельс мостового полотна); W – момент сопротивления сечения стенки балки, длиной, равной длине соседних отсеков, и толщиной, равной толщине стенки.

Коэффициент, учитывающий увеличение напряжений в зависимости от величины зазора, был получен при исследовании особенностей работы конечно-элементной модели сварного пролетного строения (Бокарев, Жунев, & Усольцев, 2018).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблица 4

Значения коэффициента плотности опирания
верхнего пояса

Величина зазора между верхним поясом и торцом ребра жесткости, мм	k_z
0	1
0,5	2,15
1	2,95
1,5	3,80
2	4,65

В связи с тем, что для железнодорожных мостов характерно большое число схем поездных нагрузок, их существенная изменчивость в течение срока эксплуатации, и, следовательно, значительные различия в их усталостных воздействиях, для определения наработки элементов сооружения целесообразным оказывается выражение накопленного повреждения от обрабатываемых нагрузок (v_i) через повреждение от эталонного поезда (v_0):

$$K_{ni} = \frac{v_i}{v_0}. \quad (8)$$

Поскольку величиной накопленного усталостного повреждения оценивается наработка, то этот коэффициент называется коэффициентом наработки. Использование коэффициентов наработки позволяет оценить различия в накоплении повреждений не только для отдельных схем поездов, но и грузопотоков за разные промежутки времени и на разных участках дорог.

Для определения коэффициента наработки за определенный период производится математическое моделирование потока подвижных нагрузок на основе информации о количестве, типе и загрузке вагонов, роде груза в вагоне, среднем весе, количестве груженых и порожних поездов, типах локомотивов. Эта информация может быть получена из статистической отчетности железных дорог.

Модель поезда формируется из групп вагонов одного типа и одного рода груза. Выбор количества групп вагонов, их типа и рода груза – случайный процесс, основанный на методе Монте-Карло (Rubinstein & Kroese, 2017). Для реализации этого метода анализируется парк

вагонов, парк локомотивов и структура грузопотока на рассматриваемом участке железной дороги. Смоделированный состав представляет собой последовательность осевых нагрузок и межосевых расстояний, который в дальнейшем «прокатывается» по линии влияния. Поскольку моделирование поездопотока имеет вероятностную основу, то коэффициент наработки принимается в виде среднего значения после прокатки ста поездов.

Для определения наработки вся история эксплуатации сооружения разбивается на несколько периодов, каждый из которых характеризуется числом прошедших поездов и соответствующим коэффициентом наработки. Общую величину наработки за весь срок эксплуатации моста определяют по формуле:

$$N_n = \sum_i N_{ni} K_{ni}, \quad (9)$$

где N_{ni} – количество поездов, прошедших за i -й период по участку дороги; K_{ni} – коэффициент наработки за i -й период эксплуатации сооружения.

Оценка остаточного ресурса соединения производится в зависимости от вероятности безотказной работы, при которой расчетный ресурс соединения больше наработки. В таблице 5 указаны состояния соединения, соответствующие интервалы вероятности безотказной работы и квантили стандартного отклонения распределения долговечности. Общий вид графика, отражающего зависимость оценки остаточного ресурса от вероятности безотказной работы сварного соединения, показан на рисунке 3.

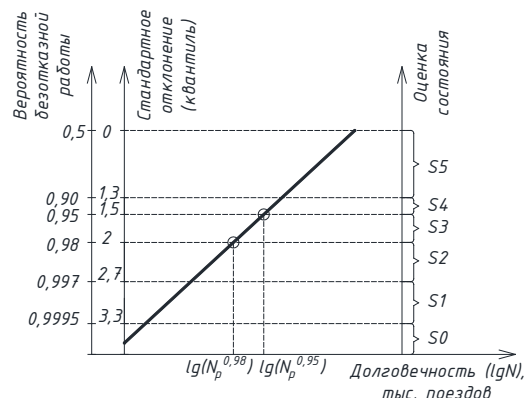


Рис. 3. График оценки остаточного ресурса в зависимости от вероятности безотказной работы

Оценка ресурса сварного соединения

Состояние	Оценка и характеристика ресурса сварного соединения	Вероятность безотказной работы / квантиль
S_0	<i>Отличное</i> Неограниченный ресурс соединения	$\geq 0,999$ $\geq 3,3$
S_1	<i>Хорошее</i> Большой ресурс соединения	$0,999...0,997$ $3,3...2,7$
S_2	<i>Удовлетворительное</i> Низкий ресурс соединения. Необходимо наблюдение	$0,997...0,98$ $2,7...2$
S_3	<i>Неудовлетворительное</i> Низкий ресурс соединения. Необходима точная оценка усталостного ресурса	$0,98...0,95$ $2...1,5$
S_4	<i>Предотказное</i> Необходимо планировать усиление в плановом порядке	$0,95...0,90$ $1,5...1,3$
S_5	<i>Отказ</i> Необходимо усиление в кратчайшие сроки	$<0,9$ $<1,3$

Результаты

На основании разработанной методики была произведена оценка усталостного ресурса сварного соединения вертикального ребра жесткости продольной балки решетчатого пролетного строения. Общий вид продольной балки и линия влияния момента в стенке около ребра жесткости № 2 показаны на рис. 4. В качестве расчетной была применена кривая усталости 9а.

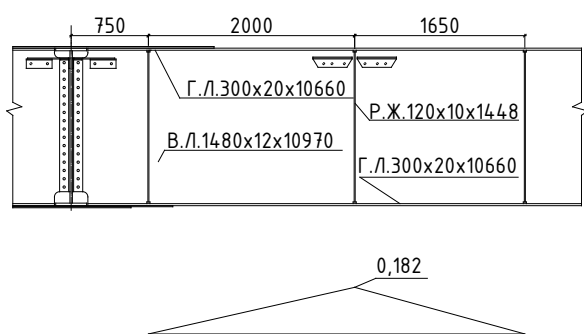


Рис. 4. Линия влияния момента в стенке балки около ребра жесткости № 2

В результате расчета было определено, что при плотном опирании верхнего пояса на ребро жесткости ($k_z = 0$) максимальные напряжения под локомотивом составляют 59,8 МПа, расчетный ресурс соединения при вероятности безотказной работы $P = 0,98$ составил 14070 эталонных поездов. При наработке равной

12610 эталонных поездов ресурс соединения оценивается как удовлетворительный. Таким образом, методика позволяет оценить остаточный ресурс сварных соединений и планировать работы по ремонту или усилению элементов болто-сварных пролетных строений для сохранения потребительских качеств конструкций.

Научная новизна
и практическая значимость

На основании численного моделирования работы стенки балки около верхнего обрыва сварного шва вертикального ребра жесткости обосновано влияние зазора между верхним поясом и торцом вертикального ребра жесткости на величину изгибающего момента в стенке балки, сформированы правила для построения линий влияния этого изгибающего момента, получена формула для определения напряжений в стенке балки при проходе подвижной нагрузки.

Получены степенные уравнения для описания кривых усталости типовых сварных соединений в зависимости от вероятности разрушения соединения.

Предложена стохастическая модель прогноза усталостного ресурса типовых болто-сварных пролетных строений железнодорожных мостов, учитывающая конструктивные особенности пролетного строения и параметры его эксплуатации.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Выводы

Описана методика, позволяющая выполнять оценку усталостного ресурса с учетом конструктивных особенностей пролетного строения и параметров его эксплуатации. Приведен пример оценки ресурса сварного соединения в эксплуатируемом типовом болто-сварном пролетном строении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Bowman, M. D., Fu, G., Zhou, E., Connor, R. J., & Godbole, A. A. (2012). *Fatigue evaluation of steel bridges*. Washington: National Academy of Sciences.
- Fueki, R., & Takahashi, K. (2018). Prediction of fatigue limit improvement in needle peened welded joints containing crack-like defects. *International Journal of Structural Integrity*, 50-64.
- Melaku, A. F., & Jung, K. S. (2017). Evaluation of welded joints of vertical stiffener to web under fatigue load by hotspot stress method. *International journal of steel structures*, 271-278.
- Rubinstein, R., & Kroese, D. (2017). *Simulation and the Monte Carlo method*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.
- Бокарев, С. А., Жунев, К. О., & Усольцев, А. М. (2018). Напряженное состояние сварных узлов железнодорожных пролетных строений. *Инженерно-строительный журнал*, 119-129.
- Бокарев, С. А., Усольцев, А. М., & Служаев, А. И. (2019). Предупреждение появления усталост-

ных трещин в сварных металлических пролетных строениях. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*, 181-193.

- Гадолина, И. В., Козлов, А. Д., Монахова, А. А., & Серебрякова, И. Л. (2019). Оптимальный способ ЦОС в задачах долговечности. *Вестник РГГУ*, 78-93.
- Жунев, К. О., Мурованный, Ю. Н., & Яшнов, А. Н. (2020). Исследование усталостной долговечности сварных соединений железнодорожных пролетных строений. *Транспортные сооружения*, 1-13.
- Ключник, С. В. (2017). Аналіз сучасного стану металевих прогонових будов. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 29-40.
- Мальгин, М. Г., & Кирьян, В. И. (2011). Пути обеспечения нормативного ресурса пролетных строений мостов. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 55-59.
- Медведев, К. В., & Мальгин, М. Г. (2014). Модель расчета мостовых конструкций на усталость по локальным напряжениям. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 89-102.
- РД 50-694-90. (1991). *Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций*. Москва: Издательство стандартов.
- Серенсен, С. В. (1985). *Усталость материалов и элементов конструкций*. Киев: Наукова думка.
- Федорченко, Д. Г., & Новиков, Д. К. (2013). Методы схематизации эксплуатационного цикла изменения напряжений системой элементарных циклов. *Известия Самарского научного центра РАН*, 267-271.

К. О. ЖУНЕВ*

* Кафедра «Мости», Сибірський державний університет шляхів сполучення, вул. Дусі Ковальчук, 191, Новосибірськ, Росія, 630049, ел. пошта junev.kirill@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0539-2619

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВТОМНОГО РЕСУРСУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ

Мета. На основі експериментально-теоретичних досліджень особливостей роботи зварних з'єднань залізничних прогонових будов, схильних до утворення найбільш поширених тріщин, удосконалити інженерну методику по оцінці втомного ресурсу таких конструкцій. **Методика.** Оцінка втомного ресурсу елемента конструкції виконується в залежності від ймовірності безвідмовної роботи з'єднання, при якій розрахунковий ресурс більше фактичного напруження. Визначення розрахункового ресурсу і напруження зварних з'єднань засноване на гіпотезі лінійного підсумовування пошкоджень. Мірою ресурсу і напруження служать накопичені ушкодження, що викликаються дією еталонного поїзда. Величина ушкодження залежить від напружень циклу і кривої втоми типового зварного з'єднання. Визначення циклів напружень, що діють в елементі конструкції при проходженні поїзда, засноване на апараті ліній впливу. Фактичне напруження з'єднання обчислюють шляхом математичного моделювання вантажопотоку за весь період експлуатації споруди. **Результати.** Описана методика, що дозволяє виконувати оцінку втомного ресурсу з урахуванням

конструктивних особливостей прогонової будови і параметрів його експлуатації. **Наукова новизна.** На основі чисельного моделювання роботи стінки балки біля верхнього обриву зварного шва вертикального ребра жорсткості обґрунтовано вплив зазору між верхнім поясом і торцем вертикального ребра жорсткості на величину напружень в стінці балки, сформувані правила для побудови ліній впливу згинального моменту, отримана формула для визначення напружень в стінці балки при проході рухомого навантаження. Отримано степеневі рівняння для опису кривих втомних типових зварних з'єднань в залежності від ймовірності руйнування з'єднання. **Практична значимість.** Запропоновано стохастична модель прогнозу втомного ресурсу типових болто-зварних прогонових будов залізничних мостів, що враховує конструктивні особливості прогонової будови і параметри його експлуатації.

Ключові слова: залізничний міст; зварна прогонова будова; втомна тріщина; залишковий ресурс; напруження; метод розрахунку; транспортний потік; математична модель

К. О. ZHUNEV*

* Department «Bridges», Siberian transport university, Dusi Kovalchuk St., 191, Novosibirsk, Russia, 630049, e-mail junev.kirill@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0539-2619

FATIGUE LIFE ASSESSMENT METHOD OF WELDED JOINTS IN RAILWAY GIRDERS

Purpose. To improve the fatigue life evaluating method of welded joints in railway girders based on experimental and theoretical studies of these structures operation. **Methodology.** The fatigue life assessment is based on the nonfailure operation probability, at which is greater than the operating time. The hypothesis of damages linear summation is used to determine the fatigue life and operating time of welded joints. Accumulated damage from the reference train is a measure of fatigue life and operating time. The amount of damage depends on the stresses and fatigue curve of a typical welded joint. Influence lines are used to determine the stresses in a construction member under moving load. The operating time of the construction member is calculated by cargo traffic mathematical modeling for the construction service life. **Results.** The method for assessing fatigue life is described. This method is taking into account the design features of the railway girder and the parameters of its operation. **Originality.** The numerical simulation of railway girder has allowed to establish the dependence of stresses on the beam web surface near the weld toe on the rigidity of stiffener fixation to beam flanges, to formulate rules for constructing bending moment influence lines, and to obtain a formula for determining stresses on the surface of the beam web under moving load. An equation is obtained for describing the fatigue curves of typical welded joints depending on the probability of joint failure. **Practical value.** A stochastic model for fatigue life predicting of typical railway welded girders is proposed. This model is taking into account the design features of the span and the parameters of its operation.

Keywords: railway bridge; welded girder; fatigue crack; residual fatigue life; operating time; design method; cargo traffic; mathematical model

REFERENCES

- Bowman, M. D., Fu, G., Zhou, E., Connor, R. J., & Godbole, A. A. (2012). *Fatigue evaluation of steel bridges*. Washington: National Academy of Sciences. (in English)
- Fueki, R., & Takahashi, K. (2018). Prediction of fatigue limit improvement in needle peened welded joints containing crack-like defects. *International Journal of Structural Integrity*, 50-64. (in English)
- Melaku, A. F., & Jung, K. S. (2017). Evaluation of welded joints of vertical stiffener to web under fatigue load by hotspot stress method. *International journal of steel structures*, 271-278. (in English)
- Rubinstein, R., & Kroese, D. (2017). *Simulation and the Monte Carlo method*. New Jersey: John Wiley and Sons. Inc. (in English)
- Bokarev, S. A., Zhunev, K. O., & Usoltsev, A. M. (2018). Napryazhennoe sostoyanie svarnykh uzlov zheleznodorozhnykh proletrykh stroeniy. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*, 119-129. (in Russian)
- Bokarev, S. A., Usoltsev, A. M., & Sluzhaev, A. I. (2019). Preduprezhdenie poyavleniya ustalostnykh treshchin v svarnykh metallicheskiykh proletrykh stroeniyakh. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 181-193. (in Russian)
- Gadolina, I. V., Kozlov, A. D., Monakhova, A. A., & Serebryakova, I. L. (2019). Optimalnyy sposob TsOS v zadachakh dolgovechnosti. *Vestnik RGGU*, 78-93. (in Russian)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Zhunev, K. O., Murovanny, Yu. N., & Yashnov, A. N. (2020). Issledovanie ustalostnoy dolgovechnosti svarnykh soedineniy zheleznodorozhnykh proletnykh stroeniy. *Transportnye sooruzheniya*, 1-13. (in Russian)
- Kliuchnyk, S. V. (2017). Analiz suchasnogo stanu metalevykh prohonovykh budov. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 29-40. (in Ukrainian)
- Malgin, M. G., & Kiryan, V. I. (2011). Puti obespecheniya normativnogo resursa proletnykh stroeniy mostov. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 55-59. (in Russian)
- Medvedev, K. V., & Malgin, M. G. (2014). Model rascheta mostovykh konstruktsiy na ustalost po lokalnym napryazheniyam. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 89-102. (in Russian)
- RD 50-694-90. (1991). *Veroyatnostnyy metod rascheta na ustalost svarnykh konstruktsiy*. Moskva: Izdatelstvo standartov. (in Russian)
- Serensen, S. V. (1985). *Ustalost materialov i elementov konstruktsiy*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
- Fedorchenko, D. G., & Novikov, D. K. (2013). Metody skhematizatsii ekspluatatsionnogo tsikla izme-neniya napryazheniy sistemoy elementarnykh tsiklov. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 267-271. (in Russian)

Надійшла до редколегії 10.09.2020.

Прийнята до друку 16.10.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 656.027:624.07

В. В. КУЛЯБКО*

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

О МОДЕЛЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С НЕСУЩИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ И ОКРУЖАЮЩИМИ СРЕДАМИ (ОБЗОР)

Цель. В работе рассматриваются история и проблемы развития статико-динамического взаимодействия транспортных средств, сооружений и объектов инфраструктуры. Во введении описаны некоторые публикации по бурно развивающейся теме, а целью статьи поставлена задача об уточнении расчетных схем и моделей. **Методика.** В методике исследований даются новые элементы динамических нагрузок внешних и возникающих от взаимодействия конструкций с экипажами. **Результаты.** Продемонстрированы примеры взаимодействия транспортных и несущих строительных объектов, а также даются рекомендуемые составы основных подсистем задач. **Научная новизна** состоит в совместном рассмотрении статики и динамики нелинейных систем, для которых неприменим принцип суперпозиции, широко используемый в методе конечных элементов (МКЭ) для независимых отдельных расчетов на статику и динамику. Удобный и привычный для инженеров опыт работы с компьютерным моделированием на базе линейной динамики в МКЭ, т.е. сервис линейных расчетов статики, может условно применяться только для первоначальной отладки линейной части нелинейных программ. Именно последнее обстоятельство и расширяет границы и значимость более обоснованных практических расчетов. **Практическая значимость.** Предложены пути развития теоретических и экспериментальных способов расчета, конструирования, испытаний и диагностики технического состояния различных объектов строительства, транспорта и машиностроения. Важнейшим практическим решением является создание школ-инкубаторов для подготовки специалистов и открытие инженерных курсов по вопросам динамики конструкций, направленных на обновление знаний и лицензирование кадров.

Ключевые слова: динамика конструкций и сред; статико-динамическое взаимодействие; высокоскоростное движение; подвижная нагрузка; сооружение; нелинейные системы

Введение

Две предыдущие конференции, организованные ДИИТом по мостам и тоннелям в 2012 (5-я) и 2018 году (6-я), публиковались в сборниках соответственно 3 и 13. Автор на первой из этих конференций обратил особое внимание на необходимость фундаментального развития научно-лабораторной базы и на расширение тематики спецкурсов по динамике конструкций и сооружений (Кулябко, 2012). На последней конференции, в 2018 году, на ее пленарном заседании автор уже выступил с докладом «Возрождение выдающихся школ динамики Днепра – как залог развития инженерного потенциала», а в статье (Кулябко, 2018а) конкретно, перечислив эти школы, предложил «ввести в резонанс» эти школы, или что от них осталось.

Причем, здесь термин «резонанс» подразумевался в двух трактовках: известного из физи-

ки и теории колебаний эффекта и активно существующего в Днепре уже более 40 лет межвузовского молодежно-студенческого кружка. В конце же той статьи читатель приглашался (соответствующими ссылками) и на просмотр восьми лекций-бесед автора по динамике в YouTube, и по другой ссылке – вступить в общедоступную группу «Динамика сооружений и кружок Резонанс» на FaceBook. Пользуясь случаем, в данной статье 2020 года опять приглашаются ВСЕ желающие в оба указанные ресурса по прежним (действующим!) ссылкам. На момент начала конференции в группе за 2,5 года состоит уже более 130 человек, в т.ч. треть – связанных с ДИИТом; «пропуск» в группу идет по рекомендациям «динамиков», по научным и педагогическим вопросам обучения динамики и т.п.

Заметим, что в работе (Кулябко, 2018а) упоминались (как бы специально для

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

HyperLoop Илона Маска) некоторые приоритетные для Днепра объекты и направления, начатые еще в 60-х годах прошлого столетия в школе динамики великого Всеволода Арутюновича Лазаряна. Сегодня, благодаря внимательному Оргкомитету «конференции с посвящением» (VII-а Міжнародна науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», що присвячена 100-річчю з дня народження академіка М. Г. Бондаря та 110-річчю з дня народження професора М. Н. Гольдштейна), выделим особо из того обширного перечня «динамических» школ Днепра двух наших действительно известных и великих профессоров ДИИТа.

Первый (по алфавиту) – «мостовик» Николай Герасимович Бондарь: 100 лет со дня рождения! А книги Николай Герасимович так и называл: «Динамика мостов» и т.п.). Я лично знаком и с его хорошими учениками: от аспирантов (Бездетко П., Попович Н., Серебрянский В.) и до продолжателей на посту заведующих его мостовой кафедры: Загора А. Л., Распопов А. С., Марочка В. В., Тюткин А. Л., Казакевич М. И. (Михаил Исаакович – не только мой давний хороший друг в жизни и сложных научных работах, но ему же я обязан консультациями и «вытаскиванием из меня» моей докторской!).

Второй великий – «грунтовик» Михаил Наумович Гольдштейн! Тут – 110 лет со дня рождения, масса книг по основаниям и грунтоведению, нормативы. Огромная практика и научный артистизм на защитах и предзащитах диссертаций! Примерно в 1967 г. я, 28-летний руководитель группы «Ипромашпрома» (ныне ГДПИ в Днепре), получив в ужасе задание «поставить в пустующий 5 лет котлован глубиной 5 м» высокий 9-тиэтажный лабораторный корпус на центральной площади у обкома партии в Запорожье, обратился к нему за помощью... «Приходите завтра на заседание кафедры!», сказал профессор. После моего краткого изложения «ужаса», Михаил Наумович потребовал мнение и совет от каждого преподавателя! Они дрожали и заикались, а он в итоге сказал «Пишите: уплотнить грунт котлована до $1,6 \text{ т/м}^3$ с проверкой в лаборатории, я подпишу заключение. А вы, кстати, запроектируйте хорошие фундаменты и подвал». И я выдал (от ужаса ведь!) целый подвал-корабль с железобетонными неразрезными стенами-балками, нижней и

верхней их арматурой... Спасибо всем этим культурным и знающим людям, отличным учителям и ученым!

Цель

В своих рекламно-информационных выступлениях в текущем году великий инноватор Илон Маск настойчиво приглашает ученых – механиков-динамиков и, конечно, айтишников и электронщиков присылать в его фирмы свои резюме. Можно, конечно, позавидовать возможностям его фирм, но ведь завидовать – нехорошо, а лучше подумать и чем-то помочь прогрессу?! Например, – в постановках задачи о статико-динамическом взаимодействии движущегося высокоскоростного транспортного средства и окружающих его сред, инфраструктуры, несущих конструкций (в том числе тоннелей или труб, мостов, оснований и т.п.).

В связи с этим приносим свои извинения за то, что в приведенном списке литературы по теме основное внимание уделялось ознакомлению читателей и коллег с некоторыми менее знакомыми мостовикам и тоннельщикам работами коллектива «Резонанс» за последнее десятилетие (Kulyabko, Raspopov, & Artomov, 2011; Kulyabko, & Yaroshenko, 2013; Kulyabko, Macarow, Nechitailo, & Yaroshenko, 2015; Eremin, Raizer, Telichenko, Kulyabko, & other, 2016; Kulyabko, & Babenko, 2018; Кулябко, 2011a; Кулябко, 2011b; Кулябко, 2011c; Кулябко, 2012; Кулябко, & Банах, 2012; Кулябко, & Ярошенко, 2012a; Кулябко, & Ярошенко, 2012b; Кулябко, & Ярошенко, 2012c; Кулябко, Банах, & Ярошенко, 2013; Кулябко, & Ярошенко, 2013; Кулябко, 2014; Кулябко, 2017; Кулябко, & Наумов, 2017; Кулябко, 2018a; Кулябко, 2018b; Кулябко, 2020).

Еще более обширную библиографию обзорного характера и методические примеры можно найти в защищенных «резонансниками» диссертациях (три докторские: Кулябко В. В., Редченко В. П., Банах В. А. и пять кандидатских: Давыдов И. И., Чабан В. П., Банах А. В., Ярошенко Д. С., Макаров А. В.).

Методика

Важнейшим элементом при научных исследованиях транспортных сооружений и связан-

ных с ними объектов является принципиальная расчетная схема и динамические модели конкретной задачи. По ним составляются модели отдельных линейных или нелинейных, плоских или пространственных подсистем и связей между ними.

Прежде всего, кроме стандартного набора постоянных и временных нагрузок, особо тщательно для транспортных сооружений выявляются наиболее характерные для местности и объекта виды и величины детерминированных и случайных внешних возмущающих воздействий типа сейсмических, температурных, ветровых и т.п. нагрузок и воздействий. Включая землетрясения и цунами, а также не только тайфуны, штормы и одиночные порывы воздушного потока, но и все возможные аэродинамические эффекты от взаимодействия этих потоков с формой и параметрами конкретного объекта (ветровой резонанс, галопирование, бафтинг и др.).

Затем после проведения специальных натурных экспериментов по определению упруго-диссипативных нелинейных свойств конструкций составляются дифференциальные уравнения (статико-динамического медленного или медленно-ползучего или быстро-мгновенного) движения всех подсистем и от внешних воздействий, и от процесса взаимодействия сооружения с экипажем (т. наз. подвижной инерционной нагрузкой). Которые впоследствии объединяются в общую математическую модель задачи. Ее с осторожностью можно назвать «компьютерной моделью», которая уже может быть ориентирована на один из подходящих видов программного обеспечения с удобным сервисом решения систем нелинейных дифуравнений (например, при помощи пакета MathCAD).

Результаты

В докладе в качестве результатов исследования обозначенного сложного вопроса механики (который не разрешился до сих пор полностью и корректно, хотя бы приближенно «по инженерному», еще с момента крушения поезда на мосту Англии в 1948 г.) будут показаны примеры динамических взаимодействий разных экипажей и машин с некоторыми мостами и

промышленными эстакадами. Например, виброграммы развития динамических напряжений при проходе колонны груженых по 30 т «Татр» по левобережной части Кайдакского моста в Днепре.

Добавим еще некоторые рекомендации, касающиеся подробностей содержания и (получаемых из опытов) свойств отдельных подсистем и элементов моделей, в частности:

- корпус экипажа, локомотива, вагона. Здесь важны не только диссипативные и жесткостные характеристики всех элементов, но и фактическое расположение масс конструкции, грузов, оборудования; способы и точки опирания, например, перевозимых длинномеров; возможности разрыва односторонних (нелинейных) связей и т.п.;

- подвешивание корпуса (контактное механическое – одно- или многоярусное; на тележках с нелинейно-упругими и нелинейно-диссипативными (например, фрикционными) элементами; бесконтактное магнитное, электродинамическое, вакуумное и др.;

- путь и направляющие (рельсы, труба с повышенным давлением, вакуумом и т.п.). При создании новых мало изученных типов транспортных средств и направляющих пути желательно на опытном участке (или кольце) проверить взаимодействие экипажа и пути с созданием всевозможных включений, стыков и «дефектов износа и ремонтов». Эти проблемы ярко иллюстрирует и канатная подвесная дорога на гибких нитях с ее сложной нелинейной механикой;

- основание. Основанием для пути и направляющих могут быть не только рельсошпальная решетка на нелинейных грунтовых основаниях с часто меняющимися «погодными» свойствами, но и загадочные большепролетные струны типа «skyway», мосты, эстакады с особыми высокими несущими опорами и др.

Все новые виды сооружений должны тщательно «обкатываться» до совпадения расчетов и тензометрии всех элементов пути и экипажей. Так делали кафедры академиков Лазаряна В. А., Бондаря Н. Г., Фишмана М. И. и Гольдштейна М. Н. в 1972-73 годах при ходовых испытаниях скоростного вагона-лаборатории (СВЛ) с реактивной тягой!

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Искусственные сооружения на пути следования, включая их особые начальные и конечные участки. Для новых высокоскоростных трасс должны быть разработаны новые нормативные материалы – после тщательных нелинейных динамических расчетов применительно к каждому виду искусственного сооружения. Причем, выводы разных организаций по экспериментам и расчетам должны обсуждаться «третьими организациями» (а мы с М. И. Казакевичем однажды на испытаниях и расчетах мостов Прибалтики были представителями «третьей страны»).

Особенности видов окружающих сред и разнообразных видов сопротивлений движению. Здесь, очевидно, могут быть использованы и требования к аэродинамике в авиации и аэропортах, а также развит большой научный и учебный опыт по изучению сил сопротивления движению существующих экипажей по различным путям (помню, этот вопрос попался мне на экзамене кандминимума по подвижному составу примерно в 1975 г.!).

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна разработанных новых теоретических и экспериментальных методик позволит создавать более достоверные статико-динамические модели и исследовать НДС, прежде всего, для реальных нелинейных систем, подсистем и связей между ними. Удобный и привычный (для инженеров за полувековой опыт работы с ПК на базе линейной динамики в МКЭ) сервис линейных расчетов статки может условно применяться только для первоначальной отладки линейной части нелинейных программ.

Развитие и внедрение для анализа и расчетов всех видов нелинейных систем предлагаемых альтернативных методик одновременного моделирования статки совместно с динамикой (одномоментно во времени, без ошибочного применения к таким системам принципа суперпозиции), позволит улучшить расчетные модели и сделать более надежными методики создания новой техники при решении задач динамики конструкций и сооружений.

В реальных системах конструкций и задач взаимодействия транспортного средства и пути линейных систем просто нет! И чем выше скорости движения, тем существеннее проявляются нелинейные эффекты. Поэтому применительно к теории и практике высокоскоростного транспорта XXI века учет всех основных нелинейностей моделей экипажа и пути просто необходим.

Выводы

Для развития теоретических и экспериментальных способов расчета, конструирования, испытаний и диагностики технического состояния различных объектов строительства, транспорта и машиностроения целесообразно быстро и качественно глубоко развивать новации, оборудование и соответствующие ветви научного и практического образования.

Для этого в такой специфической отрасли знаний, как динамика сложных объектов, рекомендуется создание:

- лицензированных лабораторий динамики конструкций;
- школ-инкубаторов для подготовки соответствующих специалистов этих лабораторий, учебных подразделений, проектных и научных организаций;
- инженерных курсов по обновлению знаний (и лицензированию кадров) по сложным вопросам динамики конструкций;
- обновление нормативной и приборной базы соответствующих задач.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Eremin, K., Raizer, V., Telichenko, V., Kulyabko, V. V., & other (2016). *Safety assessment of existing buildings and structures*. Stockholm, Sweden: FSV Construction.
- Kulyabko, V., & Babenko, M. (2018). Synergy of vibroecologists, programmers, inventors and testers of buildings and structures under the evaluation of the impact of the dynamics of structures. *Sustainable housing and human settlement* (p. 108-115). Dnipro – Bratislava: SHEE “PSACEA” – Slovak University of Technology in Bratislava.
- Kulyabko, V., Macarow, A., Nechitailo, O., & Yaroshenko, D. (2015). *Structure dynamics: calculations, designing, diagnostic tests and nonlinear*

- damping. *Harvard Journal of Fundamental and Applied Studies*, 1(7), 520-530.
- Kulyabko, V., Raspopov, O., & Artomov, V. (2011). *Actual problems of interaction of objects of the infrastructure and rolling stock*. XV International Conference "Computer Systems Aided Science, Industry and Transport", 2034-2041.
- Kulyabko, V. V., & Yaroshenko, D. S. (2013). *Interaction of frame type constructions with Tuned Mass Dampers and the damping devices having nonlinear elastic and dissipative characteristics*. Proceedings of the 4th International Conference "Nonlinear Dynamics – 2013", 99-104.
- Кулябко, В. В. (2011a). Виды динамических нагрузок и причин, вызывающих аварии зданий и сооружений. *Безопасность эксплуатируемых зданий и сооружений* (с. 52-58). Москва: РААСН, МГСУ.
- Кулябко, В. В. (2011b). Расчетно-конструкторские методы повышения безопасности и снижения амплитуд нелинейных колебаний сооружений с демпфирующими устройствами. *Безопасность эксплуатируемых зданий и сооружений* (с. 111-115). Москва: РААСН, МГСУ.
- Кулябко, В. В. (2011c). Уточнение статикодинамических моделей сооружений с учетом четырех групп нелинейностей при описании упругих и диссипативных свойств. *Безопасность эксплуатируемых зданий и сооружений* (с. 173-180). Москва: РААСН, МГСУ.
- Кулябко, В. В. (2012). Тракта о развитии научно-лабораторной базы и разработке спецкурсов по динамике конструкций и сооружений. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 3, 80-88.
- Кулябко, В. В. (2014). *Динамика сооружений – прошлое, настоящее и будущее (часть I)*. LAP: LAMBERT Academic Publishing.
- Кулябко, В. В. (2017). Новые способы решения сложных задач динамики сооружений созданы, но кто возьмётся за их внедрение и менеджмент? *Строительство, материаловедение, машиностроение (Серия «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения»)*, 100, 97-102.
- Кулябко, В. В. (2018a). Как «вести в резонанс» всемирно известные научные школы Днепра для подъёма инженерного престижа города. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 13, 46-53.
- Кулябко, В. В. (2018b). *О политехнических задачах учебных подразделений, исследующих динамику конструкций, машин, сооружений и движение грунтовых массивов*. Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта-2018, 382-390.
- Кулябко, В. В. (2020). *Использование динамических характеристик при формообразовании, конструировании и диагностике сложных сооружений, массивов и сред*. Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта-2020, 236-245.
- Кулябко, В. В., & Банах, В. А. (2012). Виброэкологические аспекты моделирования взаимодействия зданий и сооружений с основаниями при динамических воздействиях. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*, 20, 209-216.
- Кулябко, В. В., Банах, В. А., & Ярошенко, Д. С. (2013). *О проблемах анализа динамики основных и вспомогательных подсистем сооружений*. Тезисы докладов научной сессии «Прошлое и современное состояние исследований, проектирования и строительства тонкостенных пространственных конструкций (к 85-летию НИИЖБ им. А. А. Гвоздева)» Москва: НИЦ «Строительство», МОО ПК, РААСН, НИИЖБ, ЦНИИСК, ООО «Техсофт», 13-14.
- Кулябко, В., & Наумов, В. (2017). Особенности нелинейной динамики сооружений и тенденции ее развития в XXI веке. *Theoretical Foundations in Civil Engineering*, 24, 27-34.
- Кулябко, В. В., & Ярошенко, Д. С. (2012a). Особенности собственных колебаний регулярных рамных строительных конструкций на примере одноэтажных многопролетных рам. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 2, 22-30.
- Кулябко, В. В., & Ярошенко, Д. С. (2012b). Нелинейные колебания во временной области модели взаимодействия сооружения с демпфирующими устройствами. *Будівельні конструкції*, 76, 294-299.
- Кулябко, В. В., & Ярошенко, Д. С. (2012c). Нелинейное динамическое взаимодействие демпфирующих устройств с конструкциями вагонов, пути, зданий и сооружений. *Вибрация машин: измерение, снижение, защита*, 3(30), 24-30.
- Кулябко, В. В., & Ярошенко, Д. С. (2013). Колебания плоской одноэтажной многопролетной рамы с неразрезным ригелем и динамическими гасителями колебаний. *Theoretical Foundations in Civil Engineering*, 21, 251-258.

В. В. КУЛЯБКО*

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

ПРО МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З НЕСУЧИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ І НАВКОЛИШНІМИ СЕРЕДОВИЩАМИ (ОГЛЯД)

Мета. В роботі розглядаються історія і проблеми розвитку статико-динамічної взаємодії транспортних засобів, споруд і об'єктів інфраструктури. У вступі описані деякі публікації з теми, що бурхливо розвивається, а метою статті поставлена задача про уточнення розрахункових схем і моделей. **Методика.** В методиці досліджень даються нові елементи динамічних навантажень – зовнішніх і тих, що виникають від взаємодії конструкцій з екіпажами. **Результати.** Продемонстровані приклади взаємодії транспортних і несучих будівельних об'єктів, а також даються рекомендовані склади основних підсистем задач. **Наукова новизна** полягає в спільному розгляді статички і динаміки нелінійних систем, для яких неможливо застосувати принцип суперпозиції, який широко використовується в методі скінченних елементів (МСЕ) для незалежних окремих розрахунків на статичку і динаміку. Зручний і звичний для інженерів досвід роботи з комп'ютерним моделюванням на базі лінійної динаміки в МСЕ, тобто сервіс лінійних розрахунків статички, може умовно застосовуватися тільки для початкового налагодження лінійної частини нелінійних програм. Саме остання обставина і розширює межі і значимість більш обґрунтованих практичних розрахунків. **Практична значимість.** Запропоновано шляхи розвитку теоретичних і експериментальних методів розрахунку, конструювання, випробувань і діагностики технічного стану різних об'єктів будівництва, транспорту і машинобудування. Найважливішим практичним вирішенням цієї проблеми є створення шкіл-інкубаторів для підготовки фахівців і відкриття інженерних курсів з питань динаміки конструкцій, спрямованих на оновлення знань і ліцензування кадрів.

Ключові слова: динаміка конструкцій і середовищ; статико-динамічна взаємодія; високошвидкісний рух; рухома навантаження; спорудження; нелінійні системи

V. V. KULJABKO*

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

ABOUT MODELS OF INTERACTION OF HIGH-SPEED VEHICLE WITH BEARING STRUCTURES AND ENVIRONMENTS (REVIEW)

Purpose. The paper deals with the history and problems of the development of static-dynamic interaction of vehicles, structures and infrastructure facilities. The introduction describes some publications on a rapidly developing topic, and the goal of the article is to clarify the design schemes and models. **Methodology.** In the research methodology, new elements of the dynamic loads external and arising from the interaction of structures with the crews are given. **Results.** Examples of interaction between transport and load-bearing construction objects are demonstrated, and recommended compositions of the main subsystems of tasks are given. The **originality** consists in the joint consideration of the statics and dynamics of nonlinear systems, for which the superposition principle, widely used in the finite element method (FEM) for independent separate calculations for statics and dynamics, is inapplicable. Convenient and familiar experience for engineers with computer simulation based on linear dynamics in FEM, i.e. service of linear calculations of statics, can be conventionally used only for initial debugging of the linear part of nonlinear programs. It is the latter circumstance that expands the boundaries and significance of more substantiated practical calculations. **Practical value.** The ways of development of theoretical and experimental methods of calculation, design, testing and diagnostics of the technical condition of various objects of construction, transport and mechanical engineering are proposed. The most important practical solution is the creation of incubator schools for training specialists and the opening of engineering courses on structural dynamics aimed at updating knowledge and licensing personnel.

Keywords: dynamics of structures and environments; static-dynamic interaction; high speed movement; moving load; construction; nonlinear systems

REFERENCES

- Eremin, K., Raizer, V., Telichenko, V., Kulyabko, V. V., & other (2016). *Safety assessment of existing buildings and structures*. Stockholm, Sweden: FSV Construction. (in English)
- Kulyabko, V., & Babenko, M. (2018). Synergy of vibroecologists, programmers, inventors and testers of buildings and structures under the evaluation of the impact of the dynamics of structures. *Sustainable housing and human settlement* (p. 108-115). Dnipro – Bratislava: SHEE “PSACEA” – Slovak University of Technology in Bratislava. (in English)
- Kulyabko, V., Macarow, A., Nechitailo, O., & Yaroshenko, D. (2015). Structure dynamics: calculations, designing, diagnostic tests and nonlinear damping. *Harvard Journal of Fundamental and Applied Studies*, 1(7), 520-530. (in English)
- Kulyabko, V., Raspopov, O., & Artomov, V. (2011). *Actual problems of interaction of objects of the infrastructure and rolling stock*. XV International Conference “Computer Systems Aided Science, Industry and Transport”, 2034-2041. (in English)
- Kulyabko, V. V., & Yaroshenko, D. S. (2013). *Interaction of frame type constructions with Tuned Mass Dampers and the damping devices having nonlinear elastic and dissipative characteristics*. Proceedings of the 4th International Conference “Nonlinear Dynamics – 2013”, 99-104. (in English)
- Kulyabko, V. V. (2011a). Vidy dinamicheskikh nagruzok i prichin, vyzyvayushchikh avarii zdaniy i sooruzheniy. *Bezopasnost ekspluatiruemykh zdaniy i sooruzheniy* (s. 52-58). Moskva: RAASN, MGSU. (in Russian)
- Kulyabko, V. V. (2011b). Raschetno-konstruktorskie metody povysheniya bezopasnosti i snizheniya amplitud nelineynykh kolebaniy sooruzheniy s dempfiruyushchimi ustroystvami. *Bezopasnost ekspluatiruemykh zdaniy i sooruzheniy* (s. 111-115). Moskva: RAASN, MGSU. (in Russian)
- Kulyabko, V. V. (2011c). Utochnenie statiko-dinamicheskikh modeley sooruzheniy s uchetom chetyrekh grupp nelineynostey pri opisaniy uprugikh i dissipativnykh svoystv. *Bezopasnost ekspluatiruemykh zdaniy i sooruzheniy* (s. 173-180). Moskva: RAASN, MGSU. (in Russian)
- Kulyabko, V. V. (2012). Traktat o razvitiy nauchno-laboratornoy bazy i razrabotke spetskursov po dinamike konstruksiy i sooruzheniy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 3, 80-88. (in Russian)
- Kulyabko, V. V. (2014). *Dinamika sooruzheniy – proshloe, nastoyashchee i budushchee (chast 1)*. LAP: LAMBERT Academic Publishing. (in Russian)
- Kulyabko, V. V. (2017). Novye sposoby resheniya slozhnykh zadach dinamiki sooruzheniy sozdany, no kto voz-metsya za ikh vnedrenie i menedzhment? *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie (Seriya «Innovatsionnye tekhnologii zhiznennogo tsikla obektov zhilishchno-grazhdanskogo, promyshlennogo i transportnogo naznacheni-ya»)*, 100, 97-102. (in Russian)
- Kulyabko, V. V. (2018a). Kak «vvesti v rezonans» vseмирno izvestnye nauchnye shkoly Dnepra dlya podema in-zhenernogo prestizha goroda. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 13, 46-53. (in Russian)
- Kulyabko, V. V. (2018b). O politekhnicheskikh zadachakh uchebnykh podrazdeleniy, issleduyushchikh dinamiku konstruksiy, mashin, sooruzheniy i dvizhenie gruntovykh massivov. *Sovremennye innovatsionnye tekhnologii pod-gotovki inzhenernykh kadrov dlya gornoy promyshlennosti i transporta-2018*, 382-390. (in Russian)
- Kulyabko, V. V. (2020). *Ispolzovanie dinamicheskikh kharakteristik pri formoobrazovanii, konstruirovanii i diag-nostike slozhnykh sooruzheniy, massivov i sred*. *Sovremennye innovatsionnye tekhnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlya gornoy promyshlennosti i transporta-2020*, 236-245. (in Russian)
- Kulyabko, V. V., & Banakh, V. A. (2012). Vibroekologicheskie aspekty modelirovaniya vzaimodeystviya zdaniy i sooruzheniy s osnovaniyami pri dinamicheskikh vo-deystviyakh. *Theoretical Foundations of Civil Engineer-ing*, 20, 209-216. (in Russian)
- Kulyabko, V. V., Banakh, V. A., & Yaroshenko, D. S. (2013). O problemakh analiza dinamiki osnovnykh i vspomo-gatelnykh podsystem sooruzheniy. Tezisy dokladov nauchnoy sessii «Proshloe i sovremennoe sostoyanie issledo-vaniy, proektirovaniya i stroitelstva tonkostennykh prostranstvennykh konstruksiy (k 85-letiyu NIIZhB im. A. A. Gvozdeva)» Moskva: NITs «Stroitelstvo», MOO PK, RAASN, NIIZhB, TsNIISK, OOO «Tekhsoft», 13-14. (in Russian)
- Kulyabko, V., & Naumov, V. (2017). Osobennosti nelineynoy dinamiki sooruzheniy i tendentsii ee razvitiya v XXI veke. *Theoretical Foundations in Civil Engineering*, 24, 27-34. (in Russian)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Kulyabko, V. V., & Yaroshenko, D. S. (2012a). Osobennosti sobstvennykh kolebaniy regul'yarnykh ramnykh stroitel'nykh konstruktsiy na primere odnoetazhnykh mnogoproletnykh ram. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 2, 22-30. (in Russian)

Kulyabko, V. V., & Yaroshenko, D. S. (2012b). Nelineynye kolebaniya vo vremennoy oblasti modeli vzaimodeystviya sooruzheniya s dempfiyushchimi ustroystvami. *Budivelni konstruktsii*, 76, 294-299. (in Russian)

Kulyabko, V. V., & Yaroshenko, D. S. (2012c). Nelineynoe dinamicheskoe vzaimodeystvie dempfiyushchikh ustroystv s konstruktsiyami vagonov, puti, zdaniy i sooruzheniy. *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita*, 3(30), 24-30. (in Russian)

Kulyabko, V. V., & Yaroshenko, D. S. (2013). Kolebaniya ploskoy odnoetazhnoy mnogoproletnoy ramy s nerazreznym rigelem i dinamicheskimi gasitelyami kolebaniy. *Theoretical Foundations in Civil Engineering*, 21, 251-258. (in Russian)

Надійшла до редколегії 18.09.2020.

Прийнята до друку 22.10.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.13:622.268.3

Й. Й. ЛУЧКО*

* Кафедра будівельних конструкцій, Львівський національний аграрний університет, вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Україна, 80381, тел. +38 (097) 033 18 36, ел. пошта lychko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-3675-0503

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ ПІД ЧАС РУХУ ҐРУНТУ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ТРУБІ ПРИ БЕЗТРАНШЕЙНІЙ ПРОКЛАДЦІ

Мета. Метою роботи є розробка експериментально-теоретичного методу визначення коефіцієнта тертя під час руху ґрунту в циліндричній трубі, який у сучасних умовах будівництва необхідно знати при теоретичних дослідженнях для оцінки величини тиску, густини ґрунту та інших чинників при прокладці інженерних комунікацій закритим методом. **Методика.** На основі аналізу сучасних методів і способів силового впливу на ґрунтовий масив та механічних і технологічних процесів, які відбуваються у ґрунтовому масиві при прокладці інженерних комунікацій методом статичного проколу та методом продавлювання. Розробити та описати експериментально-теоретичну методику визначення коефіцієнта тертя під час руху ґрунту в циліндричній трубі, який необхідно визначати при теоретичних дослідженнях для оцінки величини тиску, густини ґрунту та інших факторів. Сформулювати основні задачі, які необхідно розв'язати у майбутньому та встановити критерії їх використання для дослідження механічних процесів при виконанні горизонтальних виробок способом ущільнення ґрунтового масиву. **Результати.** Виконано аналіз вітчизняних та закордонних науково-технічних джерел щодо прокладки інженерних комунікацій закритим способом. Зокрема, розроблено та описано експериментально-теоретичну методику визначення коефіцієнта тертя під час руху ґрунту в циліндричній трубі, який необхідно визначати при теоретичних дослідженнях для оцінки величини тиску, густини ґрунту та інших факторів при прокладці інженерних комунікацій закритим методом. Сформульовано основні задачі, які необхідно розв'язати у майбутньому та встановити критерії їх використання для дослідження механічних процесів при виконанні горизонтальних виробок способом ущільнення ґрунтового масиву. Також потрібно розв'язати задачу нестационарного рівняння руху ґрунту із врахуванням коефіцієнта тертя до зовнішньої поверхні труби. **Наукова новизна.** В даній роботі, на основі аналізу науково-технічних джерел силового впливу на суцільний ґрунтовий масив, встановлені відомості про процеси в ґрунтовому масиві при виконанні виробки методом статичного проколу і методом продавлювання. Зокрема, встановлені основні динамічні властивості ґрунтів та сформульовані теоретичні засади для дослідження механічних процесів при проведенні горизонтальних виробок способом ущільнення ґрунтового масиву. **Практична значимість.** На підставі цих даних вдалось розробити експериментально-теоретичну методику для визначення коефіцієнта тертя під час руху ґрунту циліндричній трубі, зокрема, при прокладці труб способом продавлювання закритим способом. Цей коефіцієнт необхідно знати для оцінки величини тиску, густини ґрунту та зони пластичності ґрунту та інших чинників.

Ключові слова: продавлювання; коефіцієнт тертя; прокол ґрунту; густина ґрунту; ґрунтовий масив

Вступ

Проблема та її актуальність. Особливу увагу потрібно надавати впровадженню прогресивних конструкцій будівельних матеріалів та використання сучасних технологій при будівництві споруд та інженерних комунікацій, а також при усуненні наслідків часткового чи повного руйнування проблемних ділянок земляного полотна залізничних та автомобільних доріг, наприклад під час повеней, чи посилення цих ділянок дренами.

© Й. Й. Лучко, 2020

Утворення горизонтальних виробок і свердловин при підземному прокладанні інженерних комунікацій закритим способом можуть бути реалізовані статичним вібраційним та віброударним впливами на робочий орган або їх поєднання. Будуючи інженерні комунікації під автомобільними і залізничними дорогами, трамвайними шляхами та іншими перешкодами більш ефективний є закритий метод, який не вимагає прокладання траншей. Доцільність закритого способу, методом статичного проколу чи методом продавлювання на практиці дове-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

дена, особливо при прокладання інженерних комунікацій у мегаполісах. Отже проблема, методу безтраншейної прокладки водопропускних труб, каналізації, теплових трас, підземних комунікацій, переходів і т. ін. є актуальна і очевидна.

Наше завдання, на перспективу, провести теоретичні дослідження і встановити вплив силових факторів та технологічних процесів на суцільний масив ґрунту. Зокрема, механічних процесів ущільнення ґрунтового масиву методом статичного проколу та методом продавлювання за безтраншейного прокладання труб. Змодельовати динаміку руху ґрунту у циліндричній трубі в умовах плоскої осесиметричної деформації. Визначити зону плинності ґрунту при прокладці труб, та теоретично-експериментальне визначення коефіцієнта тертя до зовнішньої поверхні труб та інші аспекти проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Механічні процеси, які проходять при руйнуванні ґрунтового або гірського масиву можна поділити на статичні та динамічні. Зокрема, впливом цих процесів займалось багато дослідників і досить добре вивчені та описані в працях (Васильєв, 1964; Баловнев, 1981; Васильєв, & Лещенко, 1993; Беляев, 2013; Беляев, 2014; Балесный, 2017). Статичні – проходять за дії постійного довготривалого навантаження, яке викликає у масиві пружні та пластичні деформації (Лучко, 2013; Лучко, 2014). Пружні деформації не змінюють структурний стан масиву і його міцності. Пластичні – проходять з порушенням структурних зв'язків між частинками і приводять до ущільнення та зменшення його початкового об'єму цими дослідженнями займалися автори вказаних вище праць.

Короткочасні та миттєві навантаження викликають у масиві динамічні процеси, які супроводжуються його руйнуванням або ущільненням. Комплексні дослідження цих процесів розглянуто в роботах Н. С. Васильєва і А. В. Лещенка (1993), Л. Т. Дворнікова і В. С. Данченка (1981), Г. Є. Лаврова і Т. Х. Саттарова (1973, 1978), Ю. А. Ветрова (1971), В. І. Баловнева (1981) та ін. Їхні дослідження дають певне уявлення про залежність зусиль, які діють на робочі органи, від фізичних властивостей масиву, параметрів технологічного процесу і конструктивних особливостей робочих органів.

На основі аналізу науково-технічних джерел наведених у працях (Беляев, 2013; Беляев, 2014), серед існуючих технологій це метод статичного проколу, метод продавлювання, метод горизонтального буріння чи метод щитової проходки формування горизонтальних свердловин для безтраншейного прокладання комунікацій діаметром до 2000 мм, на наш погляд доцільним для застосування є комбінований метод, який використовує особливості двох методів: статичного проколу та продавлювання (Васильєв, 1964; Васильєв, & Лещенко, 1993; Данилов, 2012).

Серед сучасних досліджень в яких вирішуються різні аспекти проблеми безтраншейного прокладання комунікацій слід відзначити роботи (Кравец, Каслин, Руднев, & Супонев, 2008; Кравец, Кованько, & Лук'ячук, 2015; Супонев, & Олексин, 2010; Балесный, 2017; Кравец, Посмітюха, & Супонев, 2017; Супонев, 2018a; Супонев, 2018b).

Стан дослідження способу виконання виробок горизонтальним бурінням дає змогу стверджувати (Лучко, Бубняк & Кравец, 2020), що не всі процеси достатньо вивчені. Проте, добре вивчені процеси тиску на кріплення і взаємодія кріплення з масивом ґрунту і зусилля яке необхідне для пересування кріплення з проведенням виробки.

Мета

Розробити експериментально-теоретичну методику визначення коефіцієнта тертя під час руху ґрунту в циліндричній трубі, який необхідно знати при теоретичних дослідженнях для оцінки величини тиску, густини ґрунту та інших чинників при прокладці труб закритим методом.

Методика

Постановка задачі. При побудові кривих стиснення ґрунту від тиску, а також порівняння результатів експериментів для різних σ , ρ і r_0 при рухові ґрунту у трубі і їх використання при теоретичних дослідженнях необхідно оцінити величину сили тертя, її залежність від тиску, густини і інших факторів. Оцінку коефіцієнта тертя будемо проводити за методикою, викладеною в роботі (Рахматулин, Сагомоян, & Алексеев, 1964).

Нехай зразок сипучого середовища (або інший) затиснений у жорстку обойму мають форму циліндра з зовнішнім діаметром d_0 і початковою довжиною l_0 . Припустимо, що за вимірювальний проміжок часу збурення, яке виникло на поверхні поршня, розповсюджується по всьому об'ємі зразка і кожна частинка знаходиться у стані статичної рівноваги.

Результати

Розв'язок задачі. Складемо рівняння рівноваги середовища для шару початкової товщини Δz

$$\Delta p = -\frac{2\pi r_0^2}{\pi r_0^2} \lambda(p) \Delta z \quad (1)$$

або після скорочення отримаємо

$$\Delta p = -\frac{r}{r_0} \lambda(p) \Delta z,$$

де Δp – зміна тиску по товщині шару; $\lambda(p)$ – сила тертя, яка припадає на величину початкової поверхні, z – координата шару у початковий момент часу.

Після інтегрування (1) отримаємо:

$$\int_{p_T}^{p_T(t)} \frac{dp}{\lambda_T(p)} = -\frac{2z}{r_0} \text{ або } \eta(p) = \eta(p_T^*) = \frac{2z}{r_0}, \quad (2)$$

де p_T – тиск у шарі при $z=0$; $p_T = p(t)$ – тиск у шарі при $z=0$; в залежності від часу.

Припустимо, що стиск тонкого шару δ ґрунту відбувається за законом

$$\frac{\Delta \delta z}{\delta_z} = \varphi(p)$$

де $\Delta \delta z$ – деформація тонкого шару ґрунту під тиском.

Тоді загальна (сумарна) деформація при довжині l і тиску p визначається із співвідношення

$$\left(\frac{\Delta l}{l} \right)_{\substack{l=l_0, \\ p=p_T, \\ z=0}} = \frac{1}{l_0} \int_0^l \varphi(p) dz. \quad (3)$$

Якщо із експериментальних досліджень відомі криві стиску

$$\left(\frac{\Delta l}{l} \right)_{l=2l_0} = f_2(p_T), \quad (4)$$

$$\left(\frac{\Delta l}{l} \right)_{l=l_0} = f_1(p_T), \quad (5)$$

то використовуючи співвідношення (3) разом з (2) отримаємо систему трьох рівнянь для визначення функції $\eta(p)$ тобто $V[\eta(p)] = p$ тоді рівняння (3) буде мати вигляд:

$$\left(\frac{\Delta l}{l} \right)_{\substack{l=l_0, \\ p=p_T}} = \frac{1}{l_0} \int_0^l \varphi \left\{ V \left[\eta(p_T) - \frac{2z}{r_0} \right] \right\} dz. \quad (6)$$

Із цього рівняння для визначення деформації при довжині $z=2l_0$ і тиску p_T на торці $z=0$; отримаємо таке співвідношення

$$\left(\frac{\Delta l}{l} \right)_{l=2l_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta l}{l} \right)_{\substack{l=2l_0 \\ p=p_T}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta l}{l} \right)_{\substack{l=l_0 \\ p=p_T}}, \quad (7)$$

де p_T^* – визначається з рівняння

$$\eta(p_T^*) = \eta(p_T) = \frac{2l_0}{r_0} \text{ або } p_T^* = V \left\{ \eta(p_T) - \frac{2l_0}{r_0} \right\} \quad (8)$$

Із рівняння (7) видно, що відносна деформація зразка довжиною $2l_0$ при тиску $p = p_T$ на торці $z=0$ рівна півсумі відносних деформацій зразків довжиною l_0 при тиску відповідно p_T і p_T^* на торці $z=0$. Ця деформація від p_T^* визначається із рівняння (8) і є тиском у середньому перерізі експериментальної установки при довжині її $2l$ і тиску p_T на торці $z=0$. Окрім того, знаючи функції (4) та (5) і використовуючи (7) можемо побудувати залежність $p_T^* = \psi(p^*)$.

Із співвідношення (8) отримаємо функціональне рівняння для визначення функції $\eta(p_T)$:

$$\eta(p) = \eta \left\{ \psi(p_T) \right\} + \frac{2l_0}{r_0}; \quad (9)$$

$$\lambda_T(p) = \frac{1}{\psi'(p)} \lambda \{ \psi(p) \}. \quad (10)$$

Рівняння (9) або (10) можна розв'язати методом послідовного наближення в залежності від виду функції $\psi(p)$, використовуючи той факт, що у початковий момент стиску зразка

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

густина по його висоті постійна і сила тертя при $p = 0$ відсутня, тобто $\lambda(0) = 0$.

$$\psi(p) = ap, \quad (11)$$

де a – постійна величина.

Із (10) для визначення сили тертя маємо функціональну залежність:

$$\lambda(p) = \frac{1}{a} \lambda\{ap\}. \quad (12)$$

Використовуючи метод послідовного наближення

$$\lambda(p) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a^n} \lambda\{a^n p\}. \quad (13)$$

Визначимо величину під знаком границі і враховуючи, що $a < 1$ і $\lambda(p) \rightarrow 0$ при $p \rightarrow 0$ отримаємо $\lambda(p) = p\lambda(0)$ звідки отримуємо $\lambda(p) = bp$, де $b = \text{const}$, а із рівняння (10) одержимо:

$$\lambda(p) = -\frac{r \ln a}{rl_0} p. \quad (14)$$

Таким чином, при прямолінійній залежності сил тертя, коефіцієнт тертя постійний. У подальших дослідженнях це припущення залишаємо в силі і будемо вважати, що сили тертя ґрунту до жорсткої поверхні можна у першому наближенні представити у вигляді залежності (11)

$$\lambda(p) = \lambda_T p. \quad (15)$$

Отже, наведено експериментально-теоретичну методику визначення коефіцієнта тертя під час руху ґрунту в циліндричній трубі, який необхідно знати при теоретичних дослідженнях для оцінки величини тиску, густини ґрунту і інших факторів.

Наукова новизна та практична значимість

В даній роботі, на основі аналізу науково-технічних джерел, встановлені відомості про процеси в ґрунтовому масиві. Зокрема, встановлені основні динамічні властивості ґрунтів та сформульовані теоретичні засади для дослідження механічних процесів при проведенні горизонтальних виробок способом ущільнення ґрунтового масиву. На підставі цих даних вдалось розробити експериментально-теоретичну методику для визначення коефіцієнта тертя під

час руху ґрунту циліндричній трубі, зокрема, при прокладці труб способом продавлювання закритим способом. Цей коефіцієнт необхідно знати для оцінки величини тиску, густини ґрунту та зони пластичності ґрунту та інших чинників.

Висновки

1. Розроблено та описано експериментально-теоретичну методику визначення коефіцієнта тертя під час руху ґрунту в циліндричній трубі, який необхідно визначати при теоретичних дослідженнях для оцінки величини тиску, густини ґрунту та інших факторів.

2. Сформульовано основні задачі, які необхідно розв'язати у майбутньому та встановити критерії їх використання для дослідження механічних процесів при виконанні горизонтальних виробок способом ущільнення ґрунтового масиву.

3. Надалі в процесі досліджень сформулювати і обґрунтувати основні припущення та побудувати загальну схему дослідження напружено-деформованого стану у стискаючому суцільному ізотропному масиві під дією рівномірно розподіленого навантаження за контуром виробки. Розв'язати задачу нестационарного рівняння руху ґрунту із врахуванням коефіцієнта тертя до зовнішньої поверхні труби та інші задачі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Балесный, С. П. (2017). Особенности процессов статического прокола грунта. *Вестник Харьковско-го национального автомобильно-дорожного университета*, 76, 138-141.
- Баловнев, В. И. (1981). *Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин*. Москва: Высшая школа.
- Беляев, В. С. (2013). *Анализ экспериментальных исследований поведения металлических гофрированных конструкций под воздействием статических и динамических нагрузок с учетом их совместной работы с окружающим грунтом*. Часть 2. Наукоеведение, 6 (19).
- Беляев, В. С. (2014). *Анализ экспериментальных исследований поведения металлических гофрированных конструкций под воздействием статических и динамических нагрузок с учетом их совместной работы с окружающим грунтом*. Часть 3. Наукоеведение, 1 (20).

- Васильев, Н. В. (1964). *Закрытая прокладка трубопроводов*. Москва: Недра.
- Васильев, С. Г., & Лещенко, А. В. (1993). *Технологические процессы проведения горизонтальных выработок*. Львов: Свит.
- Ветров, Ю. А. (1971). *Резание грунтов землеройными машинами*. Москва: Машиностроение.
- Данилов, Б. Б. (2012). Экспериментальное обоснование процесса транспортирования разрушенного грунта при горизонтальном бурении скважин. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 3, 82-90.
- Дворников, Л. Т., & Данченко, В. С. (1980). *Основные закономерности разрушения горных пород при вращательном бурении скважин малого диаметра машинами ограниченной мощности*. Механика разрушения горных пород: Мат. 6-й Всесоюз. конф. механики горных пород, Фрунзе, 26-31.
- Кравець, С. В., Кованько, В. В., & Лук'янчук, О. П. (2015). *Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв*. Рівне: НУВГП.
- Кравець, С. В., Каслин, Н. Д., Руднев, В. К., & Супонев, В. Н. (2008). *Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций*. Харьков: ООО «Фавор».
- Кравець, С. В., Посмітюха, О. П., & Супонев, В. Н. (2017). Аналітичний спосіб визначення опору занурення конусного наконечника в ґрунт. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование*, (97), 91-98.
- Лавров, Г. Е., & Саттаров, Т. Х. (1973). Исследование конструктивных и рабочих параметров шнековых установок горизонтального бурения. *Механизация строительства магистральных трубопроводов*, 27.
- Лавров, Г. Е., & Саттаров, Т. Х. (1978). *Механизация строительства, переходов магистральных трубопроводов под автомобильными и железными дорогами*. Москва: ВНИИСТ Главгаза СССР.
- Лучко, Й. Й. (2013). *Ґрунтознавство, механіка ґрунтів та основи і фундаменти*. Львів: Каменяр.
- Лучко, Й. Й. (2014). *Мости, труби і тунелі*. Львів: Каменяр.
- Лучко, Й. Й., Бубняк Т. І., & Кравець, І. Б. (2020). Механічні процеси у ґрунтовому масиві при горизонтальних виробках (огляд). *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 17, 41-52.
- Супонев, В. М. (2018a). Визначення величини зони деформування ґрунту конусоциліндричним наконечником і тиску на бічній поверхні. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 83, 22-28.
- Супонев, В. М. (2018b). Технологія управління проколом ґрунту та вибір силового приводу установки для її реалізації. *Наукові вісті Дніпровського університету*, 15.
- Рахматулин, Х. А., Сагомоян, А. Я., & Алексеев, Н. А. (1964). *Вопросы динамики грунтов*. Москва.
- Супонев, В. Н., & Олексин, В. И. (2010). Обоснование параметров установок для бестраншейной прокладки распределительных сетей инженерных коммуникаций методом гидростатического прокола. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, 5 (75), 66-74.

И. И. ЛУЧКО*

* Кафедра строительных конструкций, Львовский национальный аграрный университет, ул. В. Великого, 1, г. Дубляны, Украина, 80381, тел. +38 (097) 033 18 36, эл. почта lychko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-3675-0503

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГРУНТА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ПРИ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ПРОКЛАДКЕ

Цель. Целью работы является разработка экспериментально-теоретического метода определения коэффициента трения при движении грунта в цилиндрической трубе, который в современных условиях строительства необходимо знать при теоретических исследованиях для оценки величины давления, плотности почвы и других факторов при прокладке инженерных коммуникаций закрытым способом. **Методика.** На основе анализа современных методов и способов силового воздействия на грунтовый массив и механических и технологических процессов, которые происходят в грунтовом массиве при прокладке инженерных коммуникаций методом статического прокола и методом продавливания. Разработать и описать экспериментально-теоретическую методику определения коэффициента трения при движении грунта в цилиндрической трубе, который необходимо определять при теоретических исследованиях для оценки величины давления, плотности почвы и других факторов. Сформулировать основные задачи, которые необходимо решить в

© Й. Й. Лучко, 2020

будущем и установить критерии их использования для исследования механических процессов при выполнении горизонтальных выработок способом уплотнения грунтового массива. **Результаты.** Выполнен анализ отечественных и зарубежных научно-технических источников по прокладке инженерных коммуникаций закрытым способом. В частности, разработана и описана экспериментально-теоретическая методика определения коэффициента трения при движении грунта в цилиндрической трубе, который необходимо определять при теоретических исследованиях для оценки величины давления, плотности почвы и других факторов при прокладке инженерных коммуникаций закрытым способом. Сформулированы основные задачи, которые необходимо решить в будущем и установить критерии их использования для исследования механических процессов при выполнении горизонтальных выработок способом уплотнения грунтового массива. Также нужно решить задачу нестационарного уравнения движения грунта с учетом коэффициента трения к наружной поверхности трубы. **Научная новизна.** В данной работе на основе анализа научно-технических источников силового воздействия на сплошной грунтовой массив, установленные сведения о процессах в грунтовой массиве при выполнении выработки методом статического прокола и методом продавливания. В частности, установлены основные динамические свойства почв и сформулированы теоретические основы для исследования механических процессов при проведении горизонтальных выработок способом уплотнения грунтового массива. **Практическая значимость.** На основании этих данных удалось разработать экспериментально-теоретическую методику для определения коэффициента трения при движении грунта в цилиндрической трубе, в частности, при прокладке труб способом продавливания закрытым способом. Этот коэффициент необходимо знать для оценки величины давления, плотности почвы и зоны пластичности грунта и других факторов.

Ключевые слова: продавливание; коэффициент трения; прокол грунта; плотность грунта; грунтовой массив

J. J. LUCHKO*

* Department of Building Constructions, Lviv National Agrarian University, V. Velykoho Street, 1, Dubliany, Ukraine, 80381, tel. +38 (097) 033 18 36, e-mail lychko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-3675-0503

EXPERIMENTAL-THEORETICAL METHOD OF DETERMINING THE FRICTION COEFFICIENT DURING THE MOTION OF THE SOIL IN A CYLINDRICAL PIPE WITH A HORIZONTAL DEVELOPMENTS

Purpose The aim of the work is to develop an experimental-theoretical method for determining the coefficient of friction when soil moves in a cylindrical pipe, which in modern construction conditions must be known in theoretical studies to assess the magnitude of pressure, soil density and other factors when laying utility lines in a closed way. **Methodology.** Based on the analysis of modern methods and methods of force impact on the soil mass and mechanical and technological processes that occur in the soil mass when laying engineering communications using the static puncture method and the punching method. To develop and describe an experimental-theoretical method for determining the coefficient of friction during soil movement in a cylindrical pipe, which must be determined in theoretical studies to assess the magnitude of pressure, soil density and other factors. To formulate the main tasks that need to be solved in the future and establish the criteria for their use for the study of mechanical processes when performing horizontal workings by compaction of the soil mass. **Findings.** The analysis of domestic and foreign scientific and technical sources on the laying of engineering communications by a closed method is carried out. In particular, an experimental-theoretical method for determining the coefficient of friction when soil moves in a cylindrical pipe has been developed and described, which must be determined in theoretical studies to assess the magnitude of pressure, soil density and other factors when laying utility lines in a closed way. The main tasks that need to be solved in the future are formulated and the criteria for their use for the study of mechanical processes when performing horizontal workings by compaction of the soil mass are formulated. It is also necessary to solve the problem of the non-stationary equation of soil motion, taking into account the coefficient of friction to the outer surface of the pipe. **Scientific originality.** In this work, based on the analysis of scientific and technical sources of force impact on a continuous soil massif, established information about the processes in the soil massif during excavation by the static puncture method and the punching method. In particular, the basic dynamic properties of soils have been established and theoretical foundations have been formulated for the study of mechanical processes during horizontal workings by compaction of a soil massif. **Practical value.** On the basis of these data, it was possible to develop

an experimental-theoretical method for determining the coefficient of friction when soil moves in a cylindrical pipe, in particular, when laying pipes using a closed punching method. This coefficient must be known to assess the magnitude of pressure, soil density and soil plasticity zone and other factors.

Keywords: pushing; coefficient of friction; soil puncture; soil density; soil mass

REFERENCES

- Balesnyy, S. P. (2017). Osobennosti protsessov staticheskogo prokola grunta. *Vestnik Kharkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, 76, 138-141. (in Russian)
- Balovnev, V. I. (1981). *Modelirovanie protsessov vzaimodeystviya so sredoy rabochikh organov dorozhno-stroitelnykh mashin*. Moskva: Vysshaya shkola. (in Russian)
- Belyaev, V. S. (2013). *Analiz eksperimentalnykh issledovaniy povedeniya metallicheskh gofrirovannykh konstruktiv pod vozdeystviem staticheskikh i dinamicheskikh nagruzok s uchetom ikh sovmestnoy raboty s okruzhayushchim gruntom*. Chast 2. Naukovedenie, 6 (19). (in Russian)
- Belyaev, V. S. (2014). *Analiz eksperimentalnykh issledovaniy povedeniya metallicheskh gofrirovannykh konstruktiv pod vozdeystviem staticheskikh i dinamicheskikh nagruzok s uchetom ikh sovmestnoy raboty s okruzhayushchim gruntom*. Chast 3. Naukovedenie, 1 (20). (in Russian)
- Vasilev, N. V. (1964). *Zakrytaya prokladka truboprovodov*. Moskva: Nedra. (in Russian)
- Vasilev, S. G., & Leshchenko, A. V. (1993). *Tekhnologicheskie protsessy provedeniya gorizontalnykh vyrabotok*. Lvov: Svit. (in Russian)
- Vetrov, Yu. A. (1971). *Rezanie gruntov zemleroynymi mashinami*. Moskva: Mashinostroenie. (in Russian)
- Danilov, B. B. (2012). Eksperimentalnoe obosnovanie protsessa transportirovaniya razrushennogo grunta pri gorizontalmom burenii skvazhin. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 3, 82-90. (in Russian)
- Dvornikov, L. T., & Danchenko, V. S. (1980). *Osnovnye zakonomernosti razrusheniya gornykh porod pri vrashchatelnom burenii skvazhin malogo diametra mashinami ogranichennoy moshchnosti*. Mekhanika razrusheniya gornykh porod: Mat. 6-y Vsesoyuz. konf. mekhaniki gornykh porod, Frunze, 26-31. (in Russian)
- Kravets, S. V., Kovanko, V. V., & Lukianchuk, O. P. (2015). *Naukovi osnovy stvorennia zemleryino-yarusnykh mashyn i pidzemnorukhomykh prystroiv*. Rivne: NUVHP. (in Ukrainian)
- Kravets, S. V., Kaslin, N. D., Rudnev, V. K., & Suponev, V. N. (2008). *Mashiny dlya bestransheynoy prokladki podzemnykh kommunikatsiy*. Kharkov: OOO «Favor». (in Russian)
- Kravets, S. V., Posmitiukha, O. P., & Suponiev, V. N. (2017). Analitichnyi sposib vyznachennia oporu zanurennia konusnoho nakonechnyky v grunt. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Podemno-transportnye, stroitelnye i dorozhnye mashyny i oborudovanie*, (97), 91-98. (in Ukrainian)
- Lavrov, G. Ye., & Sattarov, T. X. (1973). Issledovanie konstruktivnykh i rabochikh parametrov shnekovykh ustanovok gorizontalnogo bureniya. *Mekhanizatsiya stroitelstva magistralnykh truboprovodov*, 27. (in Russian)
- Lavrov, G. Ye., & Sattarov, T. X. (1978). *Mekhanizatsiya stroitelstva, perekhodov magistralnykh truboprovodov pod avtomobilnymi i zheleznymi dorogami*. Moskva: VNIIST Glavgaza SSSR. (in Russian)
- Luchko, Y. Y. (2013). *Gruntoznavstvo, mekhanika gruntiv ta osnovy i fundamenti*. Lviv: Kameniar. (in Ukrainian)
- Luchko, Y. Y. (2014). *Mosty, truby i tuneli*. Lviv: Kameniar. (in Ukrainian)
- Luchko, Y. Y., Bubniak T. I., & Kravets, I. B. (2020). Mekhanichni protsesy u gruntovomu masivi pry horyzontalnykh vyrobkakh (ohliad). *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*. 17, 41-52. (in Ukrainian)
- Suponiev, V. M. (2018a). Vyznachennia velychyny zony deformuvannia gruntu konusnotsilyndrychnym nakonechnykom i tysku na bichnii poverkhni. *Vestnik Kharkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, 83, 22-28. (in Ukrainian)
- Suponiev, V. M. (2018b). Tekhnolohiia upravlinnia prokolom gruntu ta vybir sylovoho pryvodu ustanovky dlia yii realizatsii. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu*, 15. (in Ukrainian)
- Rakhmatulin, Kh. A., Sagomonyan, A. Ya., & Alekseev, N. A. (1964). *Voprosy dinamiki gruntov*. Moskva. (in Russian)
- Suponev, V. N., & Oleksin, V. I. (2010). Obosnovanie parametrov ustanovok dlya bestransheynoy prokladki raspredelitelnykh setey inzhenernykh kommunikatsiy metodom gidrostaticheskogo prokola. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit*, 5 (75), 66-74. (in Russian)

Надійшла до редколегії 10.09.2020.

Прийнята до друку 12.10.2020.

© Й. Й. Лучко, 2020

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.012.45:622.012.2

І. В. МЯСНИКОВ*

*Кафедра «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», НТУ «Дніпровська політехніка»,
пр. Дмитра Яворницького 19, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. (095) 706 91 66,
ел. пошта miasnykov.i.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-7525-6196

АРМУВАННЯ БЕТОНУ СПЕЦІАЛЬНИМ ВОЛОКНИСТИМ МАТЕРІАЛОМ ПРИ ТОРКРЕТУВАННІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

Мета. Практика застосування торкрет-бетону при кріпленні гірничих виробок виявила недолік даного методу. Він полягає в тому, що шар бетону налипаючи до сітки, не прилягає до поверхні виробки, тим самим утворюючи порожнини. Вирішення проблеми можливе в заміні армованої сітки на альтернативний матеріал. Таким чином, метою досліджень є – шляхом порівняльного аналізу обґрунтувати доцільність оптимізації технології кріплення гірничих виробок методом торкретування, на предмет заміни залізної сітки на спеціальну добавку до бетону на основі волокнистого матеріалу. **Методика.** Мета дослідження досягалась шляхом порівняльного аналізу результатів випробувань зразків бетону з доданими в його склад волокнистого матеріалу (поліпропілен), виконаними за іноземними нормами, і попередньо-отриманими даними комп'ютерного моделювання залізобетонної плити, щодо несучої здатності майбутнього шару торкретбетону. **Результати.** Аналіз отриманих даних виявив, що: 1) додавання такого матеріалу до складу бетону підвищить його несучу здатність як на стиск, так і на вигин; 2) його несуча здатність, в залежності від типу матеріалу та його дозування в суміші, може перевищувати несучу здатність залізобетону. Таким чином, беручи до уваги результати аналізу, можливо розглянути доцільність заміни залізної сітки на волокнистий матеріал. **Наукова новизна.** В дослідженні обґрунтована необхідність впровадження передових будівельних матеріалів, які вже почали використовувати в промисловому та цивільному будівництві, у складі бетону при кріпленні підземних гірничих виробок в умовах шахт або інших підземних виробок, які кріплять методом нанесення торкрет-бетону. **Практична значимість.** Запропонована в матеріалах дослідження добавка із поліпропіленового волокна, у порівнянні зі сталеву сіткою, має наступні переваги: виключення корозії; рівномірне, а також однорідне нанесення торкрет-бетону, зменшення усадкових тріщин в бетоні, запобігас розшаруванню бетонної суміші, зниження відскоку суміші, зменшення трудових витрат.

Ключові слова: залізобетон; дисперсноармований бетон; торкрет-бетон; гірничі виробки

Вступ

Поступове вичерпання запасів вугільних родовищ змушує проводити роботи з видобутку корисних копалин там, де раніше вони могли вважатися недоцільними, за рахунок значних матеріальних витрат, що в свою чергу неминуче знайде своє відображення в підвищенні вартості видобутої корисної копалини.

Забезпечення можливості таких робіт, за гірничо-геологічних умов, які поступово ускладнюються (Гапеев, & Сторчак, 2011; Солодянкин, А. В., Прокудин, Солодянкина, О. А., & Букин, 2020; Петренко, Банніков, & Нетеса, 2020), ставлять перед інженерами завдання розробки нових типів кріплення гірничих виробок, які при достатній несучій здатності мали б оптимальну ціну.

Прикладом вирішення такого завдання є широко розповсюджене застосування анкерного кріплення разом з тампонажем закріпного простору (Sdvyzhkova, Babets, Kravchenko, & Smirnov, 2016; Tereshchuk, Khoziaikina, & Babets, 2018). Показовим прикладом кріплення такого типу є система АСН-А (Солодянкин, А. В., Прокудин, Солодянкина, О. А., & Букин, 2020).

Для подальшого вдосконалення кріплення замість залізобетонної затяжки (міжрамна огорожа), яка має низьку міцність, високу вартість і трудомісткість установки, і, по суті, виконує функцію опалубки, може бути використаний більш технологічний і менш дорогий матеріал, а саме – міжрамна огорожа підвищеної несучої здатності (рис. 1) (Мясников, Гапеев, & Вигодин, 2019; Мясников, 2019; Мясников, 2020).

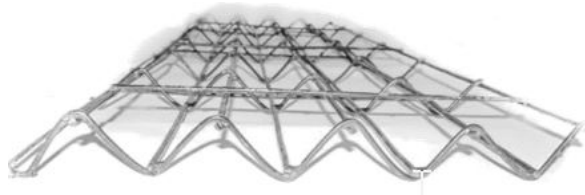


Рис. 1. Загальний вигляд міжрамної огорожі підвищеної несучої здатності

Практика використання торкрет-бетону по сталевій сітці виявила деякий недолік даного методу, а саме – торкретбетон, потрапляючи на поверхню сітки прилипає до неї, не досягаючи поверхні виробки. Таким чином з'являються порожнини між шаром бетону та поверхнею виробки, які в подальшому необхідно ліквідувати.

Одним із способів усунення недоліку може бути застосування волокнистого матеріалу в складі бетону, який вже зарекомендував себе в області промислового і цивільного будівництва. Матеріал на його основі отримав назву – дисперсноармований бетон (фібробетон) (Клюев, 2012; Клюев, & Авилова, 2013; Каприелов, & Чилин, 2013; Клюев, А. В., Клюев, С. В, Нетребенко, & Дураченко, 2014).

Фібробетон – бетон, армований рівномірно розподіленими в його об'ємі волокнами, що мають зчеплення з бетоном по їх поверхні.

Залежно від матеріалу, волокна діляться на п'ять основних різновидів: сталеві, полімерні, базальтові, поліпропіленові (рис. 2), скляні. Кожні з яких мають свої переваги і недоліки (Клюев, Нетребенко, Дураченко, & Пикалова, 2014). Варто зазначити, що для конкретного випадку необхідно підбирати як тип волокна, так і його дозування в суміші.



Рис. 2. Поліпропіленове волокно (фібра)

Мета

Беручи до уваги результати наукових досліджень, обґрунтувати доцільність оптимізації технології кріплення гірничих виробок методом торкретування, на предмет заміни залізної сітки на спеціальну добавку до бетону – фібру.

Методика

Як приклад, бралися випробування компанії «Fiberk» згідно зі стандартом EFNARC EN 14488-5: 2006. При випробуванні брався зразок квадратної пластини з певним дозуванням волокна, який пресом навантажується зосередженим зусиллям в центрі до тих пір, поки вигин зразка не досягне 25 мм.

Для випробувань використовувалася поліпропіленова фібра з такими характеристиками: довжина – 55 мм, діаметр – 0,91 мм, міцність на розтяг 560-650 МПа. Бетон класу С 20/25 (В25) з міцністю на стиск 32 МПа (326 кгс/см²).

Результати

В процесі проведення досліджень підсумки заносили до таблиці (табл. 1).

Таблиця 1

Результати дослідів

Дозування, кг/м ³	Максимальне навантаження, кг/см ²
3,0	3,2
3,5	3,6
5,0	5,3

Оскільки зіставляти показники армованого і неармованого бетону некоректно, раніше було проведено комп'ютерне моделювання різних типів залізобетонних затяжок (Мясников, Гапеев, & Вигодін, 2019), в тому числі, підвищеної несучої здатності. В результаті випробувань було встановлено, що при бетоні В25, товщиною 5 см і арматурою діаметром 4 мм зразок досягне граничних деформацій при рівномірно розподіленому навантаженні в 2,5 т/м² (0,25 кг/см²).

Підвищення характеристик бетону при додаванні різного роду фібри також доведено іноземними дослідженнями, які показали, що, поліпропіленові волокна, які включаються в бетонні зразки збільшують міцність бетону на

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

стиск від 10 % до 60 %, при вигині – від 10 % до 200 %.

Наукова новизна та практична значимість

Шляхом порівняльного аналізу результатів випробувань, була обґрунтована можливість заміни сталевий сітки на фібру у складі бетону при торкретуванні гірничих виробок.

Переваги такої заміни:

- 1) виключення корозії;
- 2) рівномірне, а також однорідне нанесення торкретбетону;
- 3) зменшення усадкових тріщин в бетоні;
- 4) запобігання розшарування бетонної суміші;
- 5) зниження відскоку суміші;
- 6) зменшення трудомісткості робіт.

Дані переваги також важливі не тільки для підземних виробок шахт, а і для виробок, при спорудженні яких використовується метод торкретування наприклад – тунелів метрополітену методом НАТМ (Мясников, 2020). Адже складні інженерно-геологічні умови будівництва тунелів метрополітенів, обумовлені наявністю водонасичених ґрунтів суттєво зменшують можливість надійної і довготривалої експлуатації підземних об'єктів. В таких умовах, разом з роботами по водовідведенню, застосування даної технології дозволить створити більш гладку поверхню виробки, що поліпшить якість проклейки майбутнього шару гідроізоляції.

Висновки

Зважаючи на вищевикладені переваги, до яких відносяться як спрощення самої технології торкретування, так і підвищення несучої здатності самого шару бетону – заміна сталевий (арматурної) сітки на матеріал на основі поліпропіленової фібри можлива. Однак, з метою запобігання нерегламентованих випадків, слід розробити систему науково-технічного супроводу в процесі будівельних робіт. В якому необхідно буде зазначити наступне:

- 1) визначити рецептуру суміші з описом методики контролю її якості (рухливість, жорсткість, осадку конуса і т.п.);
- 2) методику контролю якості майбутнього торкретбетону;
- 3) програму майбутнього геотехнічного моніторингу за станом закріпленого гірського масиву.

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.
- Tereshchuk, R. M., Khoziaikina, N. V., & Babets, D. V. (2018). Substantiation of rational roofbolting parameters. *Scientific bulletin of National Mining University*, 1, 19-26.
- Гапеев, С. Н., & Сторчак, Г. Г. (2011). *Анализ причин возникновения несимметричной нагрузки на рамную металлическую крепь и направления повышения ее несущей способности*. Перспективы освоения подземного пространства. 94-99.
- Каприелов, С. С., & Чилин, И. А. (2013). Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций. *Строительные материалы*, 28-30.
- Клюев, С. В. (2012). Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства. *Инженерно-строительный журнал*, 8(34), 61-66.
- Клюев, С. В., & Авилова, Е. Н. (2013). Мелкозернистый фибробетон с использованием полипропиленового волокна для покрытия автомобильных дорог. *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*, 1, 37-40.
- Клюев, А. В., Клюев, С. В., Нетребенко, А. В., & Дураченко, А. В. (2014). Мелкозернистый фибробетон армированный полипропиленовым волокном. *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*, 4, 67-72.
- Клюев, С. В., Нетребенко, А. В., Дураченко, А. В., & Пикалова, Е. К. (2014). *Монолитный фибробетон для полов промышленных зданий*. Искусствоведение, архитектура и строительство – Современные строительные технологии и материалы.
- Мясников, І. В. (2019). *Загальні передумови до розробки моделі комбінованого кріплення виробок глибоких вугільних шахт*. Перспективи розвитку будівельних технологій. Дніпро: НТУ «ДП», 28-32.
- Мясников, І. В. (2020). *Система НАТМ та капітальні гірничі виробки вугільних шахт*. Перспективи розвитку будівельних технологій. Дніпро: НТУ «ДП», 85-90.
- Мясников, І. В., Гапеев, С. М., & Вигодін, М. О. (2019). Випробування міжрамних огорожень за допомогою комп'ютерного моделювання. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 15, 47-53.
- Петренко, В. Д., Банніков, Д. О., & Нетеса, М. І. (2020). Геофізичні дослідження та укріплення шаруватого та водонасиченого ґрунтового ма-

сиву в умовах Київського метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 17, 62-72.

Солодянкин, А. В., Прокудин, А. З., Солодянкина, О. А., & Букин, Я. А. (2020). *Конструкция и*

технология возведения комбинированной крепи капитальных выработок шахт, проводимых в сложных геотехнических условиях. Перспективы розвитку будівельних технологій. Дніпро: НТУ «ДП», 140-144.

И. В. МЯСНИКОВ*

*Кафедра «Строительство, геотехника и геомеханика», НТУ «Днепропетровская политехника», пр. Д. Яворницького 19, Днепр, Украина, 49005, тел. (095) 706 91 66, эл. почта miasnykov.i.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-7525-6196

АРМИРОВАНИЕ БЕТОНА СПЕЦИАЛЬНЫМ ВОЛОКНИСТЫМ МАТЕРИАЛОМ ПРИ ТОРКРЕТИРОВАНИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Цель. Практика применения торкрет-бетона при креплении горных выработок обнаружила недостаток данного метода. Он заключается в том, что слой бетона прилипает к сетке, не достигая поверхности выработки, тем самым образуя пустоты. Решение проблемы возможно в замене армированной сетки на альтернативный материал. Таким образом, целью исследований является – путем сравнительного анализа обосновать целесообразность оптимизации технологии крепления горных выработок методом торкретирования на предмет замены металлической сетки на специальную добавку к бетону на основе волокнистого материала. **Методика.** Цель исследования достигалась путем сравнительного анализа результатов испытаний образцов бетона с добавленными в его состав волокнами (полипропиленовая фибра), выполненными согласно иностранным нормами, с предварительно полученным данным компьютерного моделирования железобетонной плиты, касательно несущей способности будущего слоя набрызг-бетонной крепи. **Результаты.** Анализ полученных данных выявил, что: 1) добавка волокнистого материала в состав бетона повысит его несущую способность как на сжатие, так и на изгиб; 2) его несущая способность, в зависимости от типа материала и его дозировки в смеси, может превышать несущую способность железобетона. Таким образом, принимая во внимание результаты анализа, можно судить о целесообразности замены металлической сетки на волокнистый материал. **Научная новизна.** В исследовании обоснована необходимость внедрения передовых строительных материалов, которые уже начали использовать в промышленном и гражданском строительстве, в составе бетона при креплении подземных горных выработок в условиях шахт или других подземных сооружений, которые крепят методом торкретирования. **Практическая значимость.** Предложенная в материалах исследования добавка из полипропиленового волокна к бетону, по сравнению со стальной сеткой, имеет следующие преимущества: исключение коррозии; равномерное, а также однородное нанесение торкрет-бетона, уменьшение усадочных трещин в бетоне, предотвращает расслаивание бетонной смеси, снижение отскока смеси, уменьшение трудоемкости работ.

Ключевые слова: железобетон; дисперсноармированный бетон; торкрет-бетон; горные выработки

I. V. MIASNYKOV*

*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

CONCRETE REINFORCEMENT WITH A SPECIAL FIBROUS MATERIAL WHEN MINE WORKINGS GUNNING

Purpose. The practice of using shotcrete for fastening mine workings has revealed the disadvantage of this method. It consists in the fact that a layer of concrete adheres to the mesh, not reaching the working surface, thereby forming voids. The solution to the problem is possible in replacing the reinforced mesh with an alternative material. Thus, the purpose of the research is – by means of a comparative analysis, to substantiate the expediency of optimizing the technology of fastening mine workings by the method of gunning in order to replace the metal mesh with a special additive to concrete based on fibrous material. **Methodology.** The purpose of the study was achieved by comparative analysis of the results of testing concrete samples with added fibers (polypropylene fiber), made in accordance with foreign standards, with preliminary data obtained from computer modeling of a reinforced concrete

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

slab, regarding the bearing capacity of the future layer of sprayed concrete lining. **Results.** Analysis of the data obtained revealed that: 1) the addition of fibrous material to the composition of concrete will increase its bearing capacity both in compression and in bending; 2) its bearing capacity, depending on the type of material and its dosage in the mixture, may exceed the bearing capacity of reinforced concrete. Thus, taking into account the results of the analysis, it is possible to judge the advisability of replacing the metal mesh with a fibrous material. **Originality.** The study substantiates the need for the introduction of advanced building materials, which have already begun to be used in industrial and civil construction, in the composition of concrete for fastening underground mine workings in mines or other underground structures, which are fastened by the method of gunning. **Practical value.** The addition of polypropylene fiber to concrete proposed in the research materials, in comparison with steel mesh, has the following advantages: elimination of corrosion; uniform, as well as uniform application of shotcrete, reduction of shrinkage cracks in concrete, prevents delamination of the concrete mixture, reduction of rebound of the mixture, reduction of labor intensity.

Keywords: reinforced concrete; dispersed reinforced concrete; shotcreting; mine workings

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)
- Tereshchuk, R. M., Khoziaikina, N. V., & Babets, D. V. (2018). Substantiation of rational roofbolting parameters. *Scientific bulletin of National Mining University*, 1, 19-26. (in English)
- Gapeev, S. N., & Storchak, G. G. (2011). *Analiz prichin vozniknoveniya nesimmetrichnoy nagruzki na ramnuyu metallicheskuyu krep i napravleniya povysheniya ee nesushchey sposobnosti*. Perspektivy osvoeniya podzemnogo prostranstva. 94-99. (in Russian)
- Kaprielov, S. S., & Chilin, I. A. (2013). Sverkhvysokoprochnyy samouplotnyayushchiysya fibrobeton dlya monolitnykh konstruksiy. *Stroitelnye materialy*, 28-30. (in Russian)
- Klyuev, S. V. (2012). Vysokoprochnyy fibrobeton dlya promyshlennogo i grazhdanskogo stroitelstva. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*, 8(34), 61-66. (in Russian)
- Klyuev, S. V., & Avilova, Ye. N. (2013). Melkozemnistyy fibrobeton s ispolzovaniem polipropilenovogo volokna dlya pokrytiya avtomobilnykh dorog. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova*, 1, 37-40. (in Russian)
- Klyuev, A. V., Klyuev, S. V., Netrebenko, A. V., & Durachenko, A. V. (2014). Melkozemnistyy fibrobeton armirovanny polipropilenovym voloknom. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova*, 4, 67-72. (in Russian)
- Klyuev, S. V., Netrebenko, A. V., Durachenko, A. V., & Pikalova, Ye. K. (2014). *Monolitnyy fibrobeton dlya polov promyshlennykh zdaniy*. Iskuststvovedenie, arkhitektura i stroitelstvo – Sovremennyye stroitelnye tekhnologii i materialy. (in Russian)
- Klyuev, S. V., Netrebenko, A. V., Durachenko, A. V., & Pikalova, E. K. (2014). *Monolitnyy fibrobeton dlja polov promyshlennykh zdaniy*. Iskuststvovedenie, arkhitektura i stroitel'stvo – Sovremennyye stroitel'nye tekhnologii i materialy.
- Miasnykov, I. V. (2019). *Zahalni peredumovy do rozrobky modeli kombinovanoho kriplennia vyrobok hlybokyykh vuhilnykh shakht*. Perspektivy rozvytku budivelnykh tekhnolohii. Dnipro: NTU «DP», 28-32. (in Ukrainian)
- Miasnykov, I. V. (2020). *Systema NATM ta kapitalni hirnychi vyrobky vuhilnykh shakht*. Perspektivy rozvytku budivelnykh tekhnolohii. Dnipro: NTU «DP», 85-90. (in Ukrainian)
- Miasnykov, I. V., Hapiev, S. M., & Vyhodin, M. O. (2019). Vyprobuvannia mizhramnykh ohorodzhen za dopomohoiu kompiuternoho modeliuvannia. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 15, 47-53. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Bannikov, D. O., & Netesa, M. I. (2020). Heofizychni doslidzhennia ta ukriplennia sharuvatoho ta vodonasychenoho gruntovoho masyvu v umovakh Kyivskoho metropolitenu. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 17, 62-72. (in Ukrainian)
- Solodyankina, A. V., Prokudin, A. Z., Solodyankina, O. A., & Bukin, Ya. A. (2020). *Konstruksiya i tekhnologiya vozvedeniya kombinirovannoy krep kapitalnykh vyrabotok shakht, provodimyykh v slozhnykh geotekhnicheskikh usloviyakh*. Perspektivy rozvytku budivelnykh tekhnolohii. Dnipro: NTU «DP», 140-144. (in Russian)

Надійшла до редколегії 30.04.2020.

Прийнята до друку 22.05.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.151:[539.1:517.962]

В. Д. ПЕТРЕНКО^{1*}, В. В. ХАРЧЕНКО^{2*}, Р. М. ТЕРЕЩУК³, О. М. ПЕТРОВ⁴

^{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 (056) 373 15 53, ел. пошта harchenko-76@ukr.net, ORCID 0000-0002-7653-3001

³ Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 751 25 26, ел. пошта Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511

⁴ Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта olegonator12@gmail.com

ЗАЛЕЖНОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФУНДАМЕНТІВ ТА ОСНОВ ПРИ ЇХ ВІДНОВЛЕННІ НА ОСНОВІ БУРОІН'ЄКЦІЙНИХ СВЕРДЛОВИН

Мета. Отримати залежності напружено-деформованого стану (НДС) фундаментів та основ при їх відновленні на основі бурін'єкційних свердловин для подальшого аналізу впливу розташування елементів підсилення. **Методика.** Для визначення параметрів НДС і для отримання його залежностей в фундаментах та основах при їх відновленні на основі бурін'єкційних свердловин обрано непідсилений випадок (Варіант 0) та три варіанти його підсилення (Варіант 1, Варіант 2 та Варіант 3). Підсилення виконано ґрунтоцементними палями довжиною 4 м діаметром 0,5 м, створеними на основі бурін'єкційної технології. Для чотирьох варіантів розроблено відповідні скінченно-елементні моделі. Їх чисельний аналіз проводився із застосуванням професійного ліцензійного комплексу SCAD. **Результати.** Отримано ізолінії та ізополя переміщень в моделях. Похибка між аналітичним розрахунком та чисельним аналізом складає 3 %, що свідчить про адекватність розробленої моделі. Побудовано залежності НДС фундаментів та основ при їх відновленні на основі бурін'єкційних свердловин, які свідчать, що варіантом, який максимально знижує рівень переміщень, є Варіант 1. Аналіз вертикальних переміщень доводить, що вони в центральній точці фундаменту зменшуються у 2,05 рази (Варіант 1), 1,87 рази (Варіант 2) та 1,59 рази (Варіант 3). Аналітичні закономірності напруженого стану показують стійке падіння горизонтальних напружень у 2,77 рази (Варіант 1), 1,80 рази (Варіант 2) та 1,09 рази (Варіант 3) та стійке зростання вертикальних напружень у 6,20 рази (Варіант 1), 4,06 рази (Варіант 2) та 1,38 рази (Варіант 3). **Наукова новизна.** Вона полягає в отриманні залежностей відновлення конструкцій фундаментів та основ на базі бурін'єкційних свердловин на основі чисельного аналізу НДС системи «фундамент–основа». **Практична значимість.** Полягає в обґрунтуванні зміни НДС при варіації розташування елементів відновлення, створених на основі бурін'єкційної технології.

Ключові слова: фундамент; основа; бурін'єкційні свердловини; метод скінченних елементів; напружено-деформований стан

Вступ

Довгострокова експлуатація системи «фундамент–основа», яка залежить від технології спорудження та перебігу існування, частіш усього пов'язана із поступовим вичерпанням несучої здатності (міцності) та збільшенням деформацій. Це, в свою чергу, потребує вживання заходів, що направлені на часткове, але достатнє для нормальної експлуатації вказаної системи, відновлення властивостей обох частин системи, що розглядається. Як будь-яка систе-

ма із змінними параметрами, які пов'язані в акті взаємодії, фундаменти і основи потребують зовнішньої інженерної дії, що направлена на відновлення.

Під відновленням фундаментів та основ слід розуміти приведення міцносних та деформаційних характеристик системи «фундамент–основа» до експлуатаційних, тобто таких, що забезпечують міцність, стійкість, надійність та довговічність. Відновлення основ різними шляхами може відбуватися як на стадії будівництва, так і експлуатації, відновлення фундаментів – тільки на стадії експлуатації.

Відновлення основ при спорудженні фундаментів часто практикується як зміна природного стану ґрунту і приведення його у стан експлуатаційний. Це досягається, наприклад, найбільш розповсюдженим методом поверхневого механічного ущільнення (Dubinchyk, Bannikov, Kildieiev, Kharchenko, 2020). Звісно, що такий метод відновлення міцносних та деформаційних характеристик ґрунту основи можливий лише на стадії будівництва. Після того, як споруджено фундамент, розпочинається його взаємодія із основою, яка може втрачати свої експлуатаційні характеристики.

Збільшення деформацій в процесі експлуатації ґрунтових основ також призводить до підвищеної деформаційної здатності фундаментів, які просідають та розпочинають процес тріщиноутворення. Відповідно, зменшення міцності основи призводить до зниження міцності фундаменту. Такий же випадок можливий і за умови того, що до початку спорудження фундаменту властивості основи не були відновлені або збільшення міцності та зменшення деформативності ґрунту відбувалося із технологічними помилками. Відновлення конструкцій фундаментів та основ в процесі їх експлуатації значно складніше, ніж при спорудженні.

Основним принципом відновлення фундаментів та основ при реконструкції є занурення різними методами вертикальних або похилих елементів підсилення (Камбефор, 1971; Малинин, 2009). Основними, найчастіше застосовуваними технологіями створення таких елементів на сьогоднішній день є три: вдавнення, буронабивна та буроін'єкційна (Covil, & Skinner, 1994; Dubinchyk, Petrenko, Ihnatenko, & Kildieiev, 2019; Малинин, 2009). Також в останній час значного розвитку отримали ще декілька технологій – бурозмішувальна (Kutzner, 1996; Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, Tiutkin, & Andreev, 2019), електророзрядна, укручування паль тощо. Всі вони застосовуються, але найбільш практично розвинутою є буроін'єкційна, що і розглядається в наданій роботі.

Якщо аналізувати вказані технології, слід відмітити їх переваги. Усі вони дозволяють створювати елементи підсилення високої несучої здатності, причому буроін'єкційна технологія, на відміну від вдавлювання та буронабив-

ної, дозволяє створювати похилі елементи. Для усіх трьох технологій є можливість армування елементів підсилення, які залежно від інженерно-геологічних умов можуть мати довжину до 12 м (в середньому – 5...8 м) (Малинин, 2009).

Буроін'єкційна технологія відновлення фундаментів та основ базується на засадах спеціального способу хімічного закріплення ґрунтів (ХЗГ) – струминної цементації (Ржаницын, 1986; Парамонов, Кудрявцев, & Богов, 2006; Бройд, 2004; Малинин, 2009), що відома за кордоном як технологія *Jet-grouting* (Covil, & Skinner, 1994; Kutzner, 1996). Інші способи ХЗГ (силікатизація, смолізація, бітумізація, глинізація) також застосовувалися і продовжують застосовуватися, але їх частка, на відміну від цементації, дуже мала (Ржаницын, 1986).

При застосуванні *Jet-grouting* міцність та деформаційна здатність матеріалу ґрунтоцементних елементів залежить від фізико-механічних характеристик ґрунту, що відновлюється. Міцність укріпленого ґрунту на стиск в МПа наведена в джерелі (Петренко, Тюткін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2019); Малинин, Жемчугов, & Гладков (2011) наводять залежності одновісної міцності на стиск та модуля деформації ґрунтоцементу від обсягу цементу.

Ця технологія відпрацьована, а недоліки, такі як високий тиск в системі ін'єктування, критично проаналізовані в ряді наукових робіт. Елементи підсилення, що виконані за допомогою буроін'єкційної технології, призначені для підсилення і фундаментів, і основ, відновлюючи їх міцність та зменшуючи деформації. Застосування цієї технології в конкретних точках фундаменту дозволяє змінити нерівномірний деформований стан, вирівнявши значення переміщень та привівши їх до середнього.

На відміну від технологій вдавлювання та створення буронабивних паль, буроін'єкційна технологія є такою, що найменше вторгається систему «фундамент–основа» при проведенні операцій по створенню елементів підсилення. Проведене до початку реконструювання та при надбудові відновлення основи з допомогою буроін'єкційної технології дозволяє значно підняти несучу здатність ґрунту, підготувавши його до додаткового збільшення навантаження.

Мета

Мета роботи полягає в отриманні залежностей напружено-деформованого стану (НДС) фундаментів та основ при їх відновленні на основі бурін'єкційних свердловин.

Методика

Для визначення параметрів НДС для отримання його залежностей при відновленні фундаментів та основ на основі бурін'єкційних свердловин обрано непідсилений випадок (Варіант 0) та три варіанти його підсилення ґрунтоцементними палями довжиною 4 м діаметром 0,5 м, створеними на основі бурін'єкційної технології (рис. 1).

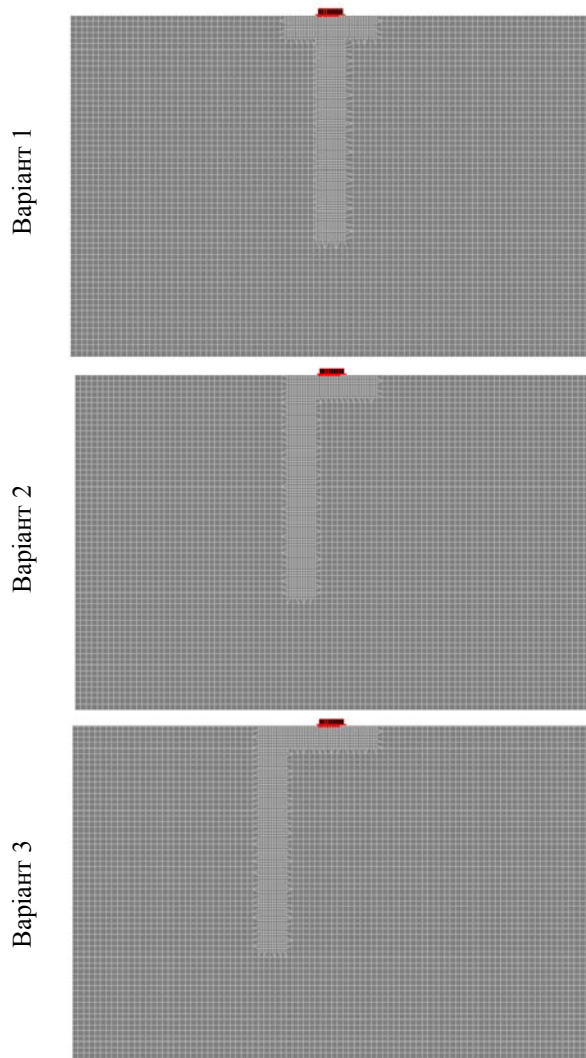


Рис. 1. Скінченно-елементні моделі підсилення системи «фундамент–основа»

Слід окремо підкреслити, що Варіант 1 можливий для втілення лише на етапі спорудження фундаменту і завчасного відновлення основи, Варіанти 2 і 3 впроваджуються і при будівництві, і при реконструкції.

Деформаційні характеристики обрані у відповідності із дослідженими ґрунтами основи: суглинки, питома вага $\gamma=1,9 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E=15 \cdot 10^3 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,3$; фундамент – залізобетон, питома вага $\gamma=2,45 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E=35 \cdot 10^6 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,2$; матеріал елемента підсилення – паля, що створена за допомогою бурін'єкційної технології, питома вага $\gamma=2,4 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E=2 \cdot 10^6 \text{ кПа}$ (при обсязі цементу 480 кг/м^3 за даними роботи Малинина, Жемчугова, & Гладкова (2011)), коефіцієнт Пуассону $\nu=0,2$.

Скінченно-елементна модель є плоскою. До неї прикладені граничні умови: знизу – заборона переміщення по всім трьом осям X, Y та Z, по боках – заборона по осях X та Y, по перпендикулярних сторонах моделі – заборона по осі Y (умова плоскої деформації). Верх моделі вільний від граничних умов.

У ролі навантаження моделі було прийнято розподілене по ширині стіни 380 мм , значення узяті із аналітичного розрахунку фундаменту (ширина фундаменту $b=1,6 \text{ м}$, товщина фундаменту $h=0,4 \text{ м}$) – $316,83 \text{ кН/м}$.

Розв'язуючи задачу взаємодії в системі «фундамент–основа», необхідно враховувати правило знаків для переміщень і напружень, яке прийнято таким чином, що лінійні переміщення додатні, якщо вони спрямовані в сторону зростання відповідної координати.

Результати

Чисельний аналіз розроблених чотирьох моделей (непідсилений випадок та три варіанти підсилення) проводився із застосуванням професійного ліцензійного комплексу SCAD. Після проведених розрахунків були отримані результати напружено-деформованого стану чотирьох варіантів (компоненти переміщень, нормальних та дотичних напружень). Задля економії місця статті нижче наведені лише найхарактерніші з них (рис. 2-3), а залежності представлені для усіх, що були проаналізовані, без наведення проміжних результатів чисельного аналізу.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

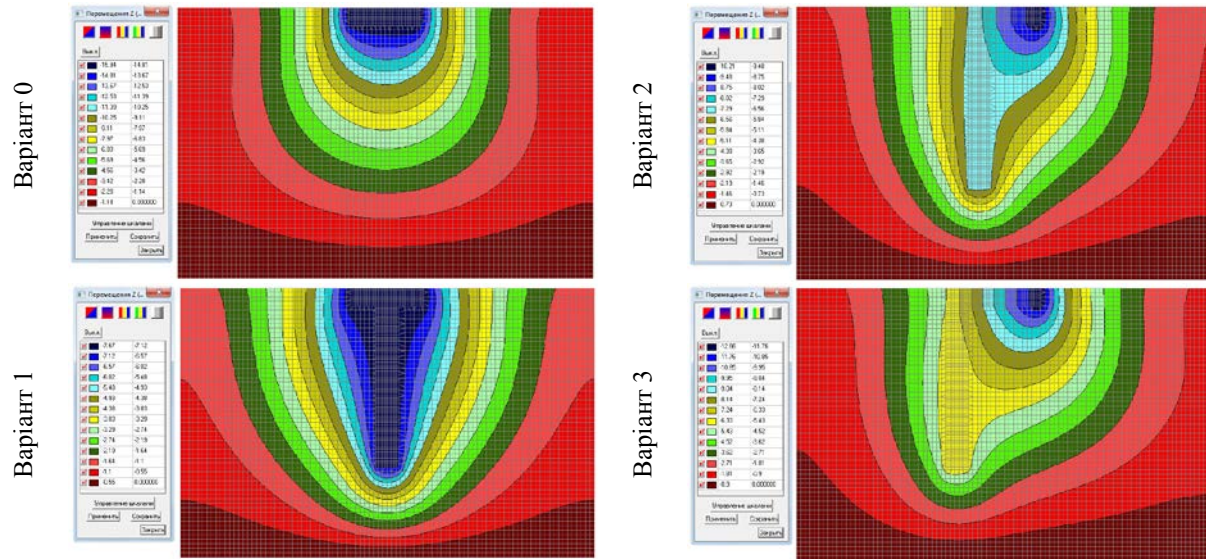


Рис. 2. Ізолінії та ізополя переміщень по осі Z (вертикальна) в фрагменті моделей

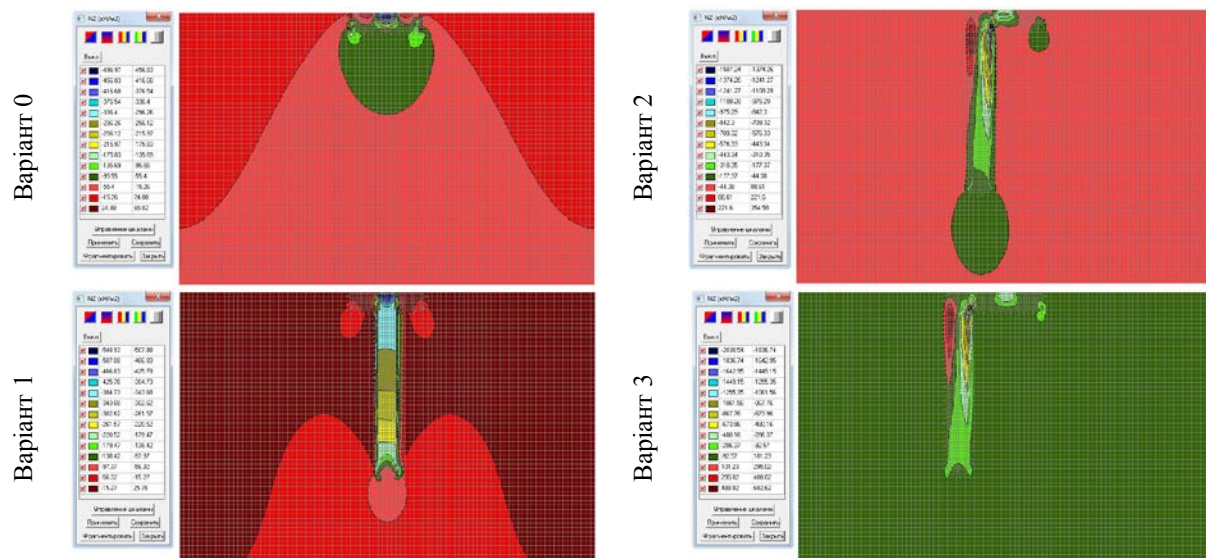


Рис. 3. Ізолінії та ізополя нормальних напружень по осі Z (вертикальна) в фрагменті моделей

Аналіз НДС проводився для фундаменту, причому в його конструкції визначено характерні точки, в яких вимірювалися переміщення та напруження, отримані в ході чисельного аналізу варіантів (рис. 4).

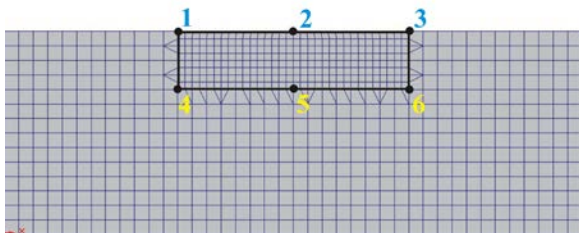


Рис. 4. Характерні точки конструкції фундаменту

Оскільки скінченно-елементні моделі відтворювали варіанти відновлення фундаменту та основи, два з яких (Варіант 2 і Варіант 3) мають несиметричне розташування паль, що створені на основі буроін'єкційної технології, то переміщення та напруження вимірюються на двох крайніх точках фундаменту. Переміщення (див. рис. 2) вимірюються в точках 1-3, а напруження (див. рис. 3) – в точках 4-6, тобто на контакті частин системи «фундамент–основа». Слід також відмітити, що для Варіанта 2 точки 1 та 4 співпадають із тілом палі, що пробурена у фундаменті та ін'єктована в ньому.

На рис. 5 наведено діаграму зміни горизонтальних переміщень. Варіантом підсилення вертикальними елементами, створеними на основі буроін'єкційної технології, що максимально знижує рівень горизонтальних переміщень, є Варіант 1. В Варіанті 2 та 3, які представляють

собою несиметричне розміщення елемента підсилення, що практикується доволі часто (буріння лише зі сторони підвалу або зовні фундаменту), горизонтальні переміщення значно зросли. Це пояснюється локальним підвищенням жорсткості системи «фундамент–основа».

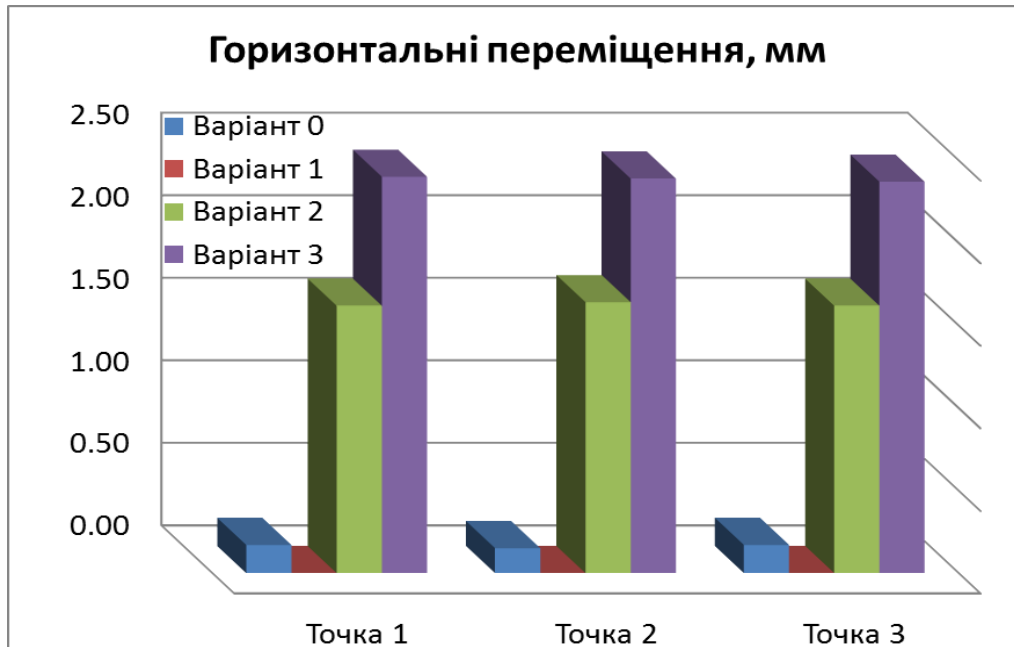


Рис. 5. Діаграма залежності горизонтальних переміщень (мм) в точках моделі системи «фундамент–основа»

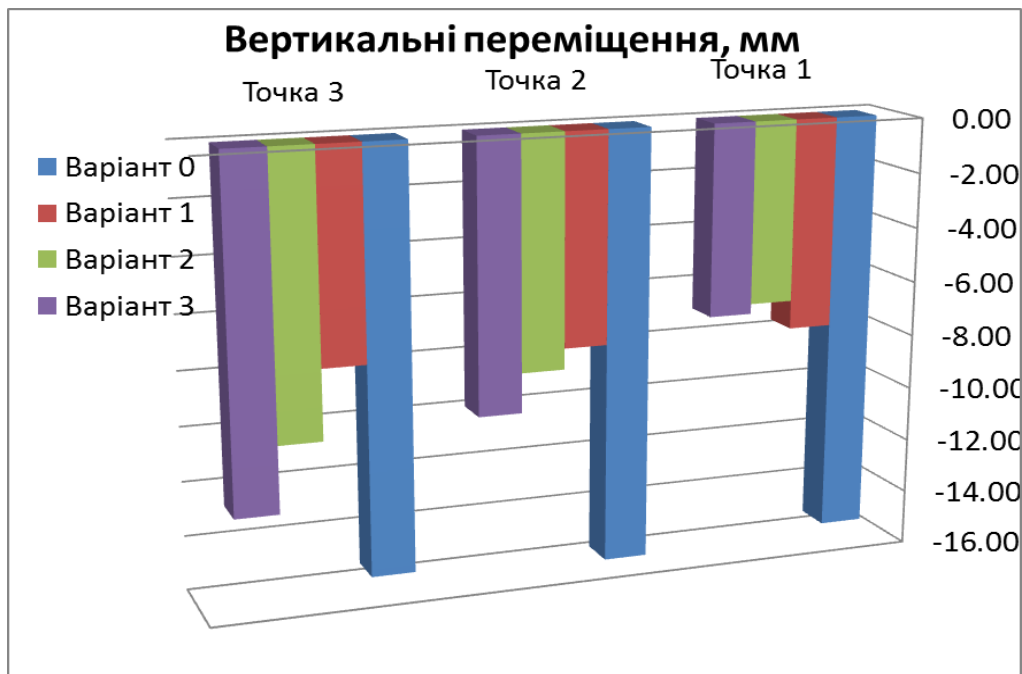


Рис. 6. Діаграма залежності вертикальних переміщень (мм) в точках системи «фундамент–основа»

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

На рис. 6 наведено діаграму зміни вертикальних переміщень, яка є більш чіткою, оскільки уведення вертикальних елементів підсилення, створених на основі буроін'єкційної технології, направлений на максимальний вплив на саме цю компоненту переміщень.

Аналіз діаграми надає змоги зробити висновок, що усі три варіанти зменшують рівень переміщень в 1,21...2,32 рази. Перед тим, як порівнювати вертикальні переміщення Варіанту 0 (непідсилена основа) із трьома варіантами підсилення, слід порівняти результати аналітичного розрахунку та чисельного аналізу. Осідання основи фундаменту складало 1,62 см, в скінченно-елементній моделі воно дорівнює 1,57 см, тобто похибка між аналітичним розрахунком та чисельним аналізом складає 3 %, що свідчить про адекватність побудованої моделі.

Аналіз вертикальних переміщень доводить, що вони в точці 2 (центральна точка фундаменту) зменшуються у 2,05 рази (Варіант 1), 1,87 рази (Варіант 2) та 1,59 рази (Варіант 3). Варіант 1 зменшує рівень вертикальних переміщень більш рівномірно 2,01...2,05 рази, Варіанти 2 і

3 хоча і мають максимальне зниження в точці 1, але в загальному деформуванні відіграють не дуже значну роль. Це пояснюється тим, що зачурення вертикальних елементів, що призводить до деформований стан до неоднорідного, найбільш впливає в зоні максимального розвитку деформацій.

Остаточний висновок про ефективність впливу вертикальних елементів підсилення, створених на основі буроін'єкційної технології, можна зробити після аналізу напруженого стану, результати якого наведені на діаграмах (рис. 7 і 8). Першим можна відмітити значну неоднорідність напруженого стану (горизонтальна компонента) Варіантів 2 і 3, в яких, по причині стрибкоподібної зміни жорсткості біля однієї межі фундаменту (точка 4), спостерігається зміна знаку напружень. Побудувати залежність розподілу горизонтальних напружень в точках 4 і 6, тобто на обрізі фундаменту, практично неможливо. Але характер зміни горизонтальних напружень в точці 5 (вісь симетрії) є характерним.

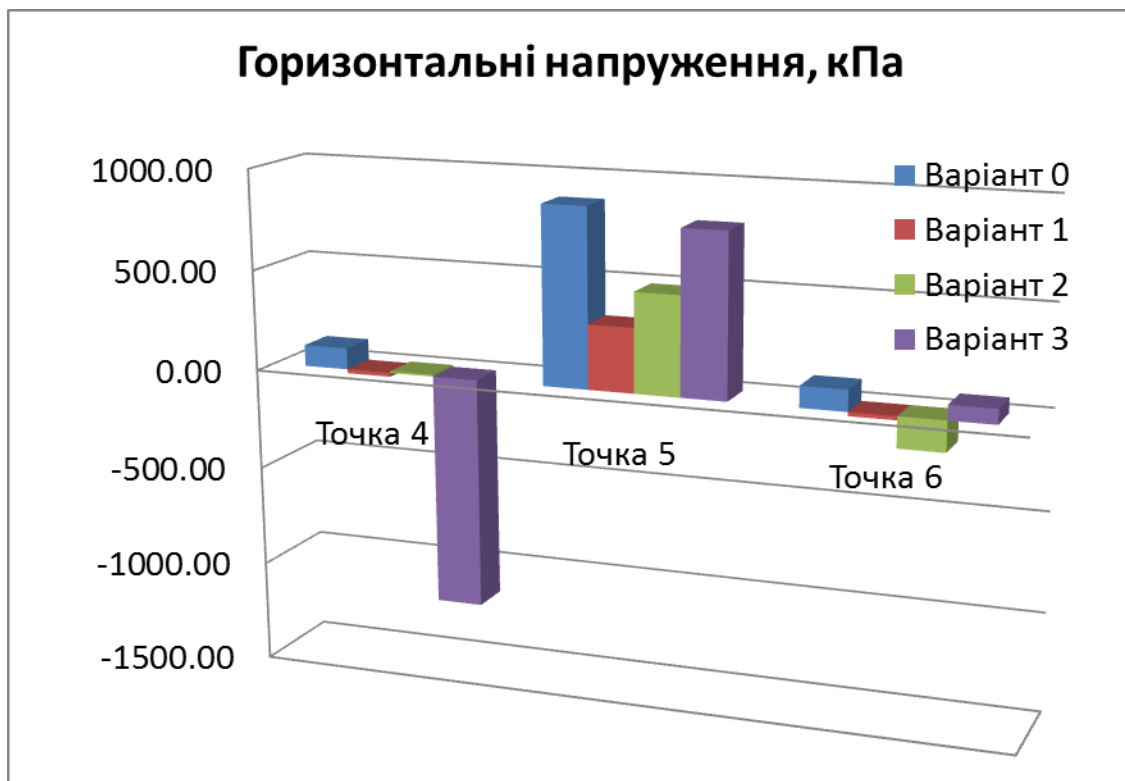


Рис. 7. Діаграма залежності горизонтальних напружень (кПа) в точках системи «фундамент–основа»

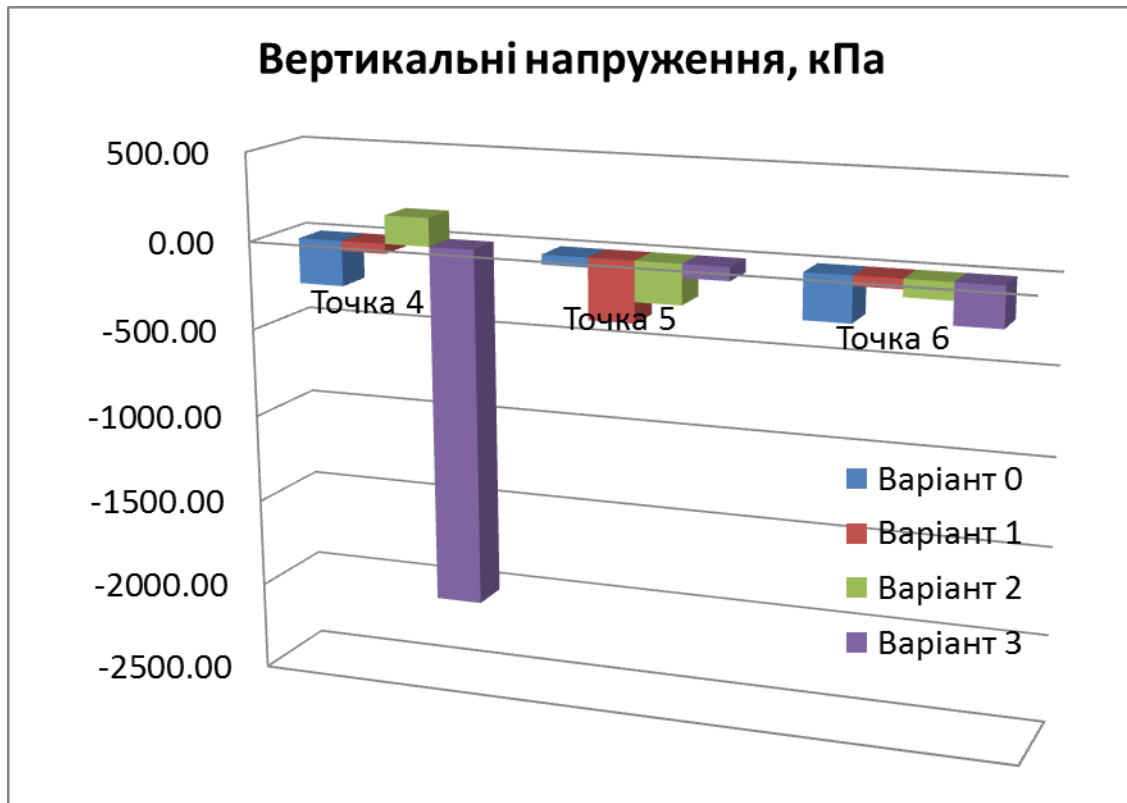


Рис. 8. Діаграма залежності вертикальних напружень (кПа) в точках системи «фундамент–основа»

Порівняння трьох варіантів відновлення фундаменту та основи за допомогою елементів, створених на основі буроін'єкційної технології, показує стійке падіння горизонтальних напружень у 2,77 рази (Варіант 1), 1,80 рази (Варіант 2) та 1,09 рази (Варіант 3). Однак, аналізуючи вертикальні напруження, слід відмітити, що відбувається стійке зростання вертикальних напружень у точці 5 у 6,20 рази (Варіант 1), 4,06 рази (Варіант 2) та 1,38 рази (Варіант 3). Це пояснюється тим, що елемент підсилення, створений на основі буроін'єкційної технології, зменшуючи вертикальні переміщення, призводить до концентрації вертикальних напружень. Але максимальне значення вертикальних напружень не свідчать про їх високий рівень, що міг би призвести до руйнування бетону фундаменту: -343,68 кПа у Варіанті 1, -225,20 кПа у Варіанті 2 та -76,33 кПа у Варіанті 3.

Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, в даній статті на основі чисельного аналізу НДС системи «фундамент–основа» отримано залежності відновлення

конструкцій фундаментів та основ на базі буроін'єкційних свердловин.

Практичне значення має обґрунтування зміни НДС при варіації розташування елементів відновлення, створених на основі буроін'єкційної технології. В подальшому заплановано провести чисельний аналіз на основі методу скінчених елементів в просторовій постановці.

Висновки

Основним висновком після аналізу залежностей НДС варіантів є те, що варіантом відновлення частин системи «фундамент–основа», який активно впливає на деформований стан, зменшуючи вертикальні переміщення, є Варіант 1, тобто конструкція вертикальних елементів, створених на основі буроін'єкційної технології, розташованих під фундаментом. Це свідчить про те, що найкращим сценарієм відновлення слабкої основи є той, що запроваджується під час будівництва, оскільки Варіант 1 можливо втілити лише при спорудженні фундаменту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Covil, C. S., & Skinner, A. E. (1994). Jet grouting: A review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process. *Grouting in the Ground*, 605-627.
- Dubinchyk, O., Bannikov, D., Kildieiev, V., & Kharchenko, V. (2020). Geotechnical analysis of optimal parameters for foundations interacting with loess area. *II International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 168, 00024.
- Dubinchyk, O., Petrenko, V., Ihnatenko, D., & Kildieiev, V. (2019). Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *I International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 109, 00020.
- Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V., Tiutkin, O., & Andreev, V. (2019). Improving the safety of soil foundations when they are restored using soil-cement elements. *2nd International Scientific and Practical Conference "Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport"*.
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema.
- Бройд, И. И. (2004). *Струйная геотехнология*. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов.
- Камбефор, А. (1971). *Инъекция грунтов. Принципы и методы*. Москва: Энергия.
- Малинин, А. Г. (2009). *Струйная цементация грунтов*. Москва: Стройиздат.
- Малинин, А. Г., Жемчугов, А. А., & Гладков, И. Л. (2011). Определение физико-механических свойств грунтоцемента в ходе натурных исследований. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, 1, 325-330.
- Парамонов, В. Н., Кудрявцев, С. А., & Богов, С. Г. (2006). Закрепление грунтов оснований фундаментов зданий по струйной технологии при увеличении нагрузок. *Развитие городов и геотехническое строительство*, 10, 192-199.
- Петренко, В. Д., Тютюкин, О. Л., Крисан, В. І., & Крисан, В. В. (2019). Відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням ґрунтоцементними елементами. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 65-74.
- Ржаницын, Б. А. (1986). *Химическое закрепление грунтов в строительстве*. Москва : Стройиздат.
- Соколович, В. Е. (1980). *Химическое закрепление грунтов*. Москва : Стройиздат.

В. Д. ПЕТРЕНКО^{1*}, В. В. ХАРЧЕНКО^{2*}, Р. Н. ТЕРЕЩУК³, О. Н. ПЕТРОВ⁴

^{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 (056) 373 15 53, эл. почта harchenko-76@ukr.net, ORCID 0000-0002-7653-3001

³ Кафедра строительства, геотехники и геомеханики, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», просп. Д. Яворницкого, г. Днепр, Украина, 49005, тел. +38 (095) 751 25 26, эл. почта Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511

⁴ Кафедра «Мосты и тоннели», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта olegonator12@gmail.com

ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТОВ И ОСНОВАНИЙ ПРИ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИИ НА ОСНОВЕ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СКВАЖИН

Цель. Получить зависимости напряженно-деформированного состояния (НДС) фундаментов и оснований при их восстановлении на основе буроинъекционных скважин для дальнейшего анализа влияния расположения элементов усиления. **Методика.** Для определения параметров НДС и для получения его зависимостей в фундаментах и основаниях при их восстановлении на основе буроинъекционных скважин выбран случай без усиления (вариант 0) и три варианта его усиления (Вариант 1, Вариант 2 и Вариант 3). Усиление выполнено ґрунтоцементными сваями длиной 4 м диаметром 0,5 м, созданными на основе буроинъекционной технологии. Для четырех вариантов разработаны соответствующие конечно-элементные модели. Их

© В. Д. Петренко, В. В. Харченко, Р. М. Терещук, О. М. Петров, 2020

численный анализ проводился с применением профессионального лицензионного комплекса SCAD. **Результаты.** Получены изолинии и изополя перемещений в моделях. Погрешность между аналитическим расчетом и численным анализом составляет 3 %, что свидетельствует об адекватности разработанной модели. Построенные зависимости НДС фундаментов и оснований при их восстановлении на основе буроналивочных скважин свидетельствуют, что вариантом, который максимально снижает уровень перемещений, является Вариант 1. Анализ вертикальных перемещений доказывает, что они в центральной точке фундамента уменьшаются в 2,05 раза (вариант 1), 1,87 раза (вариант 2) и 1,59 раза (вариант 3). Аналитические закономерности напряженного состояния показывают устойчивое падение горизонтальных напряжений в 2,77 раза (вариант 1), 1,80 раза (вариант 2) и 1,09 раза (вариант 3) и устойчивый рост вертикальных напряжений в 6,20 раза (вариант 1), 4,06 раза (вариант 2) и 1,38 раза (вариант 3). **Научная новизна.** Она заключается в получении зависимостей восстановления конструкций фундаментов и оснований на базе буроналивочных скважин на основе численного анализа НДС системы «фундамент–основание». **Практическая значимость.** Заключается в обосновании изменения НДС при вариации расположения элементов восстановления, созданных на основе буроналивочной технологии.

Ключевые слова: фундамент; основание; буроналивочные скважины; метод конечных элементов; напряженно-деформированное состояние

V. D. PETRENKO^{1*}, V. V. KHARCHENKO², R. M. TERESHCHUK³, O. M. PETROV⁴

^{1*} Department «Bridges and tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, 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, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail harchenko-76@ukr.net, ORCID 0000-0002-7653-3001

³ Department construction, geotechnics and geomechanics, Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 751 25 26, e-mail Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511

⁴ Department «Bridges and tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail olegonator12@gmail.com

DEPENDENCE OF STRAIN-DEFORMED STATE OF FOUNDATIONS AND BASES DURING THEIR RESTORATION ON THE BASIS OF GROUT-INJECTED PILE TECHNOLOGY

Purpose. To obtain the dependences of the stress-strain state (SSS) of foundations and bases during their restoration on the basis of grout-injected piles for further analysis of the influence of the location of reinforcement elements. **Methodology.** To determine the SSS parameters and to obtain its dependencies in the foundations and bases during their restoration based on grout-injected piles, a case without reinforcement (option 0) and three options for its reinforcement (Option 1, Option 2 and Option 3) were selected. Reinforcement was carried out with 4 m long soil-cement piles with a diameter of 0.5 m, created on the basis of grout-injected pile technology. Corresponding finite element models have been developed for four options. Their numerical analysis was carried out using a professional licensed SCAD complex. **Findings.** Contours and isofields of displacements in the models are obtained. The error between analytical calculation and numerical analysis is 3%, which indicates the adequacy of the developed model. The constructed dependences of the stress-strain state of foundations and bases during their restoration based on grout-injected piles indicate that the option that minimizes the level of displacements is Option 1. Analysis of vertical displacements proves that they decrease 2.05 times at the center point of the foundation (option 1), 1.87 times (option 2) and 1.59 times (option 3). Analytical patterns of the stress state show a steady drop in horizontal stresses by 2.77 times (option 1), 1.80 times (option 2) and 1.09 times (option 3) and a steady increase in vertical stresses by 6.20 times (option 1), 4.06 times (option 2) and 1.38 times (option 3). **Originality.** It lays in obtaining the dependencies of restoring the structures of foundations and bases based on grout-injected piles based on the numerical analysis of the stress-strain state of the “foundation-base” system. **Practical value.** It consists of the substantiation of the change in the stress-strain state with a variation in the location of the restoration elements created on the basis of grout-injected piles technology.

Keywords: foundation; base; grout-injected pile; finite element method; stress-strain state

© В. Д. Петренко, В. В. Харченко, Р. М. Терешук, О. М. Петров, 2020

REFERENCES

- Covil, C. S., & Skinner, A. E. (1994). Jet grouting: A review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process. *Grouting in the Ground*, 605-627. (in English)
- Dubinchyk, O., Bannikov, D., Kildieiev, V., & Kharchenko, V. (2020). Geotechnical analysis of optimal parameters for foundations interacting with loess area. *II International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 168, 00024. (in English)
- Dubinchyk, O., Petrenko, V., Ihnatenko, D., & Kildieiev, V. (2019). Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *I International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 109, 00020. (in English)
- Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V., Tiutkin, O., & Andreev, V. (2019). Improving the safety of soil foundations when they are restored using soil-cement elements. *2nd International Scientific and Practical Conference "Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport"*. (in English)
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema. (in English)
- Broyd, I. I. (2004). *Struynaya geotekhnologiya*. Moskva: Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov. (in Russian)
- Kambefor, A. (1971). *Inektsiya gruntov. Printsipy i metody*. Moskva: Energiya. (in Russian)
- Malinin, A. G. (2009). *Struynaya tsementatsiya gruntov*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)
- Malinin, A. G., Zhemchugov, A. A., & Gladkov, I. L. (2011). Opredelenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntotsementa v khode naturnykh issledovaniy. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*, 1, 325-330. (in Russian)
- Paramonov, V. N., Kudryavtsev, S. A., & Bogov, S. G. (2006). Zakreplenie gruntov osnovaniy fundamentov zdaniy po struynoy tekhnologii pri uvelichenii nagruzok. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitelstvo*, 10, 192-199. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Krysan, V. I., & Krysan, V. V. (2019). Vidnovlennia mitsnosnykh ta deformatyvnykh kharakterystyk zemlianoho polotna ta yoho osnovy armuvanniam gruntotsementnyimi elementami. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 65-74. (in Ukrainian)
- Rzhanitsyn, B. A. (1986). *Khimicheskoe zakreplenie gruntov v stroitelstve*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)
- Sokolovich, V. Ye. (1980). *Khimicheskoe zakreplenie gruntov*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)

Надійшла до редколегії 11.09.2020

Прийнята до друку 26.10.2020

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191:624.139.62-026.656

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, І. С. ОСТАПЕНКО²

^{1*} 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

² Кафедра військової підготовки спеціалістів Держспецтрансслужби, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (068) 838 67 63, ел. пошта igorostapenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2232-7138

ПІДСИЛЕННЯ ФУНДАМЕНТІВ АВТОМОБІЛЬНИХ МОСТІВ В КОНТЕКСТІ ПРОБЛЕМНОГО СТАНУ ТРАНСПОРТНО-ДОРОЖНЬОГО КОМПЛЕКСУ

Мета. Метою роботи є проведення аналізу існуючих вітчизняних та світових методів підсилення фундаментів автомобільних мостів з врахуванням впливу різних факторів та умов експлуатації зазначених об'єктів в контексті проблемного стану транспортно-дорожнього комплексу. **Методика.** Висвітлено проблемні питання забезпечення безперебійного функціонування транспортних напрямків в сучасних умовах. Визначені комплексні заходи, спрямовані на відновлення експлуатації транспортної інфраструктури шляхом оперативного реагування на наявні та виникаючі загрози виведення з ладу транспортних напрямків внаслідок воєнних дій, диверсій, стихійних лих, техногенних аварій. **Результати.** Узагальнення сучасних світових та вітчизняних методів підсилення фундаментів мостів надало можливості дослідження найбільш ефективних, економічно вигідних та простих у технологічному виконанні конструкцій. Запропоновано чотири напрямки розвитку підсилення фундаментів: 1) збільшення площі опирання фундаментів мілкою закладання на природних основах; 2) влаштування додаткових пальових фундаментів з об'єднанням їх в загальну конструкційну систему з існуючими фундаментами та спорудженням додаткових опор; 3) підсилення існуючих пальових фундаментів шляхом зміни несучої спроможності основ; 4) влаштування інших конструктивних елементів для забезпечення підсилення існуючих фундаментів мостів. **Наукова новизна.** Вона полягає в постановці задачі підсилення фундаментів автомобільних мостів в контексті проблемного стану транспортно-дорожнього комплексу. **Практична значимість.** На основі результатів проведеного аналізу можна рекомендувати найбільш економічно обґрунтовані та швидко реалізовані методи підсилення фундаментів мостів для прийняття проектних рішень при реалізації державних програм будівництва та розвитку транспортно-дорожнього комплексу України та в сучасній світовій практиці.

Ключові слова: транспортно-дорожній комплекс; міст; фундамент; підсилення; реконструкція; відновлення

Вступ

Виконуючи аналіз викликів і загроз національній безпеці, які виникають на даний час, слід зазначити, що на пріоритетних позиціях виступають виклики і загрози економічної безпеки в контексті проблемного стану транспортно-дорожнього комплексу. До них відносяться:

- незадовільний стан будівельних конструкцій (Марочка, & Бобошко, 2018);
- моральна застарілість та фізичний знос об'єктів транспортно-дорожнього комплексу (Лантух-Ляшенко, 2008);
- необхідність розвитку інфраструктури для забезпечення функціонування транспортних напрямків відповідно потреб національної еко-

© О. Л. Тютюкін, І. С. Остапенко, 2020

номіки та забезпечення захисту її територіальної цілісності та незалежності сьогодні (Шемаєв, 2018).

Ця проблематика висвітлювалася в наукових колах багато разів, але з часом, враховуючи останні глобальні процеси в світі, її актуальність лише загострюється (Горбулін, Власюк, Лібанова, & Ляшенко, (Ред.), 2015; Шемаєв, 2018). Для умов гібридної війни проти України вона детально проаналізована в роботах (Горбулін, Власюк, Лібанова, & Ляшенко, (Ред.) (2015); Горбулін, (Ред.), 2017).

У роботі під редакцією В. П. Горбуліна (2017, С. 112) обґрунтовано витоки застосування «транспортної зброї» у гібридній війні проти

України. В цьому контексті слід визнати, що на часі дуже актуальна проблематика глобалізації світових ринків та постійної боротьби провідних держав світу за ресурси, ринки виробництва та збуту, постійний пошук нових ринків збуту та посилення присутності на існуючих. Похідною вирішення цієї задачі є забезпечення контролю з боку провідних держав основних напрямів руху ресурсів та товарів для забезпечення потреб економіки.

При дослідженні цієї задачі, на перший погляд, основною метою держав є вирішення завдань захисту своєї економіки та боротьба з конкуренцією на ринках збуту з урахуванням глобалізації світових економічних процесів. Але при більш детальному розгляді на перший план виходить політичне домінування з боку провідних держав світу на визначених територіях, яке впроваджується через забезпечення контролю над транспортними коридорами та логістичним забезпеченням. Виходячи з цього, реалізація політики провідних держав в транспортній сфері спрямована на забезпечення стійкого функціонування їхніх транспортно-логістичних систем із завданнями пріоритетного забезпечення потреб національних економік.

Відповідно при розгляді заданої проблематики на фоні пріоритетних завдань розвитку національної транспортної системи України можна впевнено визначити стратегічними пріоритетами держави забезпечення сталого розвитку національної транспортної системи не лише як запоруки економічного зростання держави та забезпечення зайнятості населення, але й як спосіб посилення міжнародного впливу і позицій України в світі. Окремо слід визначити проблему впливу на стан та умови сталого функціонування транспортно-дорожнього комплексу цілеспрямованого знищення транспортної інфраструктури Донбасу у проведенні гібридної війни проти України (Горбулін, (Ред.), 2017, С. 340).

Мета

Мета роботи полягає в проведенні аналізу існуючих вітчизняних та світових методів підсилення фундаментів мостів з врахуванням впливу різних факторів та умов експлуатації зазначених об'єктів в контексті проблемного стану транспортно-дорожнього комплексу.

Методика

Військова агресія на сході України та проведення антитерористичної операції в Донецькій та Луганській областях виявили низку проблемних питань в системі захисту національних інтересів в цілому, територіальної оборони та застосування сил оборони в контексті готовності, захищеності та спроможності об'єктів транспортної інфраструктури до забезпечення виконання зазначених завдань. При цьому слід зазначити, що ця проблематика є актуальною для всієї транспортної інфраструктури держави. Так, за статистикою Державної служби автомобільних доріг з 17 тисяч існуючих автомобільних мостів майже 9 тисяч (тобто 50 %) знаходяться в незадовільному або аварійному стані та потребують термінового капітального ремонту або реконструкції.

Аналогічна ситуація склалася в залізничній компоненті транспортної галузі: за даними Укрзалізниці з 17 тисяч штучних споруд (7 тис. мостів, 90 шляхопроводів, 251 пішохідний міст), що експлуатуються, різні дефекти мають 2,5 тис. споруд (14,3 %). При цьому найбільш складна ситуація саме з мостами: у 1431 з них є несправності, що складає 20,5 % загальної кількості. Дефекти штучних споруд, як і незадовільний стан колій та автомобільних шляхів, призводять до обмеження швидкості руху транспорту, зменшення вантажопідйомності та негативно впливають на пропускну спроможність транспортних напрямків.

Проведення активної фази АТО в Донецькій та Луганській областях у 2014 та 2015 роках призвело до значних руйнувань. У приведеному аналізі (Лист заступника начальника об'єднаного оперативного штабу Збройних Сил України № 313/5/2313 від 24.03.2016 р.) відмічається, що при проведенні активної фази антитерористичної операції на території Донецької та Луганської областей значна частина критичних об'єктів транспортної інфраструктури зазнала пошкоджень або часткових чи повних руйнувань. За наведеними довідковими даними Укрзалізниці, станом на 2020 рік в районах проведення Операції об'єднаних сил (ООС) залишилося пошкодженими понад 1610 об'єктів залізничної інфраструктури, на відновлення яких, за попередніми підрахунками, необхідно витратити близько 860 млн. грн.

У районі проведення бойових дій на сході України зазнали руйнувань понад 1700 кілометрів автодоріг загального користування, зруйновано 33 мости і шляхопроводи загальною довжиною понад 2800 погонних метрів. Орієнтовна сума збитків, завданих дорожньому господарству, оцінюється в 4,8 млрд. грн. При цьому слід зазначити, що наведені показники не остаточні, адже повністю оцінити вартість зруйнованих об'єктів транспортної інфраструктури можна буде після доступу до всіх зруйнованих об'єктів, значна частина яких перебуває в окремих районах Донецької та Луганської областей, непідконтрольних уряду України, що безпосередньо позначається на показниках роботи транспортної галузі.

Більша частина штучних споруд продовжує експлуатуватися, знаходячись в незадовільному стані внаслідок експлуатації в умовах ненормованих навантажень, фізичного зносу, впливу кліматичних факторів та пошкоджень внаслідок ведення бойових дій та диверсійної діяльності.

Сучасний досвід проектування та відновлення мостів, зруйнованих внаслідок ведення бойових дій на сході України, надає нам можливість висвітлити наступні проблемні питання забезпечення безперебійного функціонування транспортних напрямків в сучасних умовах:

- недосконалість нормативного законодавства стосовно визначення критеріїв короткотермінового, тимчасового та капітального відновлення штучних споруд з врахуванням сучасних вимог до умов експлуатації та навантажень (відсутність національних нормативних актів, визначаючих порядок та способи виконання відновлення об'єктів транспортної інфраструктури за тимчасовими та короткотерміновими способами, що в свою чергу унеможливорює проектування та швидке виконання відновлення об'єктів зазначеними способами);

- необхідність типових методів відновлення мостів та шляхопроводів з урахуванням сучасних норм постійних та тимчасових навантажень, з використанням існуючих конструкцій та фундаментів з метою зменшення вартості відновлювальних робіт та термінів їх виконання;

- потреба в обстеженні стратегічних (критичних) об'єктів транспортної інфраструктури із визначенням завчасних обсягів робіт технічно-

го прикриття, а саме завчасне підсилення фундаментів опор, підсилення несучих конструкцій з метою збільшення несучої спроможності об'єктів.

Розгляд зазначених проблемних питань підсилення фундаментів опор автомобільних мостів, як об'єктів критичної інфраструктури, які є найменше захищеними та відповідно є найбільшої імовірності ураження, забезпечить створення в державі комплексних заходів, спрямованих на безперебійне функціонування транспортної інфраструктури шляхом оперативного реагування на наявні та виникаючі загрози виведення з ладу транспортних напрямків внаслідок воєнних дій, диверсій, стихійних лих, техногенних аварій.

Результати

Виходячи із зазначених факторів впливу транспортно-дорожнього комплексу на економічну складову національної безпеки, пропонується виділити та розглянути окремо мости як споруди критичної інфраструктури (Лантух-Лященко, 2004), будівництво, відновлення та реконструкція яких є достатньо складний, економічно затратний та тривалий в часі процес. Окремо слід зазначити, що цільове знищення або виведення з ладу (приведення у непридатний стан для подальшої експлуатації) одного або декількох зазначених об'єктів фактично завжди призводить до значного зменшення функціональності транспортного напрямку.

Проблематика моніторингу мостів як об'єктів критичної інфраструктури актуальна протягом всього періоду незалежності нашої держави. За дослідженнями (Безбабічева, Кірієнко, Черепньов, & Топчій, 2016) в Україні експлуатуються понад 28000 мостів загальною протяжністю більше 805,8 км. Більшість мостів побудовані зі збірних залізобетонних конструкцій. 63 % таких мостів будувалися ще за нормами 1962 року, або попередніх та в більшості не задовольняють вимогам діючих норм за вантажопідйомністю та габаритами. До того ж протягом у 2006 та 2009 р. були введені в дію нові нормативи з проектування, що передбачають більші проектні навантаження (А15 та НК-80) (ДБН В. 1.2-15:2009, 2009). У рішенні Міжвідомчої комісії з питань науково-технологічної безпеки при Раді національної безпеки і оборони України від 13 жовтня 2009 зверталась увага

на те, що «...критичний стан автодорожніх мостів та транспортних споруд як складових систем життєзабезпечення на території України підвищує ризик виникнення Надзвичайних ситуацій техногенного та природного характерів і становить Відповідно до статті 7 Закону України «Про основи національної безпеки України» загрозу національній безпеці в економічній та екологічній сферах...».

Відновленню та реконструкції мостів приділялося достатньо уваги як в вітчизняних наукових колах, так і в світовому науковому товаристві. Так, авторами дослідження (Кваша, & Салійчук, 2013) реконструкції автомобільних мостів, пошкоджених внаслідок повеней в Львівській та Закарпатській областях зазначено, що при відновленні об'єктів інфраструктури, які зазнали пошкодження внаслідок впливу природних або техногенних факторів доцільно приймати проєктні рішення підсилення існуючих фундаментів та конструкцій мосту, що дозволяє значно зменшити вартість відновлювальних робіт в порівнянні з новим будівництвом або капітальним ремонтом із заміною старих конструкцій на нові.

Основними видами реконструкції мостів є збільшення габаритних розмірів мостового полотна, підсилення несучої спроможності мостового полотна шляхом влаштування монолітної залізобетонної плити, підсилення конструктивних елементів прогонових споруд та опор, підсилення фундаментів опор. В наведеному дослідженні (Кваша, & Салійчук, 2013) проведено аналіз прийнятих проєктних рішень при відновленні пошкоджених повенями мостів в західних регіонах України та наведено висновки щодо економічної доцільності збереження існуючих конструкцій мостів при їх реконструкції.

В даній роботі пропонується розглянути питання підсилення фундаментів мостів як найбільш складної конструкційної складової при реконструкції (відновленні) мостів. Проблема цього питання обумовлена наступними факторами:

- фундаменти опор мостів, як правило, розміщені в важкодоступних та складних для виконання робіт умовах місцевості з сильно пересіченими рельєфами місцевості;
- виконання робіт з підсилення конструкційних елементів фундаментів проводяться з

врахуванням впливу на конструкції постійних навантажень та неможливості їх розвантаження;

- виконання робіт по підсиленню фундаментів мостів обумовлено технологічною складністю робіт, що виконуються, внаслідок обмеженого простору обумовленого наявними конструкціями прольотів мосту;

- виконання робіт з підсилення фундаментів мостів потребує завчасних вишукувальних та підготовчих робіт, що в свою чергу збільшує часові показники виконання робіт.

Враховуючи наведені фактори логічно прийти до висновку, що підсилення фундаментів мостів є достатньо складним технологічним процесом, виконання якого потребує значної витрати часу та інших ресурсів.

Сучасні вітчизняні та світові наукові школи мостобудування визначають наступні способи підсилення фундаментів мостів (Gega, & Bozo, 2017; Марочка, & Бобошко, 2018; Davis, Hoornaar, Agrawal, Sanayei, & Jalinoos, 2019):

- збільшення площі обпирання фундаментів мілкою закладання на природних основах;
- влаштування додаткових пальових фундаментів з буронабивних, гвинтових та інших типів паль з об'єднанням їх в загальну конструкційну систему з існуючими фундаментами та спорудженням додаткових опор;
- підсилення існуючих пальових фундаментів шляхом зміни несучої спроможності основ за рахунок влаштування додаткових палевих фундаментів або окремих паль;
- влаштування інших конструктивних елементів для забезпечення підсилення існуючих фундаментів мостів.

Перелічені способи не є остаточними та допускають різні варіанти поєднання конструкційних рішень. Об'єктами окремих досліджень є взаємодія існуючих конструкцій з новими, взаємодія фундаментів з основами під впливом різних груп навантажень.

Особливої актуальності розгляд питань підсилення конструктивних елементів та фундаментів мостів набув при вирішенні завдань із забезпечення розгортання і проведення антитерористичної операції на території Донецької та Луганської областей. Так, при забезпеченні розгортання сил антитерористичної операції, першочерговим питанням стало збільшення вантажопідйомності автомобільних мостів для

пропуску важкої техніки, що було вирішено шляхом влаштування додаткових тимчасових опор на лежневих фундаментах із застосуванням інвентарних металевих конструкцій та типових елементів із збірного залізобетону (блоки, плити, балки та інше). Але слід зазначити, що в більшості випадків всі ці заходи виконувалися ситуативно та не мали системного підходу, потребували додаткового часу для їх виконання та додаткових витрат. Мали місце випадки влаштування додаткових мостових переправ на ближньому обході з застосуванням парків важких механізованих мостів та інвентарних низько водних мостів внаслідок незадовільного стану капітальних мостів та їх неспроможності забезпечити пропуск важкої техніки.

Але влаштування ближніх обходів є достатньо витратним заходом та поряд з цим наявний ресурс інвентарних тимчасових мостів досить обмежений. Поряд з цим застосування інвентарних та важких механізованих мостів є короткотермінове, використовувати їх протягом тривалого часу без постійного обслуговування неможливе.

Наукова новизна та практична значимість

На основі результатів проведеного аналізу можна рекомендувати найбільш економічно обґрунтовані та швидко реалізовані методи підсилення фундаментів мостів для прийняття проектних рішень при реалізації державних програм будівництва та розвитку транспортно-дорожнього комплексу України та в сучасній світовій практиці. Подальші дослідження заплановано для влаштування додаткових пальових фундаментів з об'єднанням їх в загальну конструкційну систему з існуючими фундаментами та визначенням аналітичних закономірностей напружено-деформованого стану підсилення фундаментів при варіації параметрів підсилення.

Висновки

Виходячи з наведеного, визначено, що основними об'єктами забезпечення переправ через водні перешкоди та суходоли при переміщенні військ у 2014 – 2015 роках були автомобільні мости на дорогах загального та місцевого значення у Донецькій та Луганській областях. Внаслідок активних бойових дій значна частина об'єктів на напрямках просування

сил АТО зазнали значних пошкоджень або були знищені.

Питання тимчасового відновлення цих об'єктів та забезпечення пропуску транспорту слід оперативно вирішувати експлуатаційними підрозділами Укравтодору, підрозділами ДСНС та Держспецтрансслужби. Слід зазначити, що виконання робіт ускладнювалося загрозою вогневого впливу з боку незаконних збройних формувань та необхідністю постійної перевірки місцевості та об'єктів на наявність вибухових речовин. Також ускладнювало виконання робіт відсутність технічної документації майже на всі об'єкти та брак часу на проведення камеральних досліджень. Але основним недоліком є відсутність обґрунтованого та простого рішення підсилення фундаментів автомобільного мосту. Таким чином, актуальність поставленої проблеми підсилення фундаментів мостів є на часі та потребує термінового розгляду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Davis, N. T., Hoomaan, E., Agrawal, A. K., Sanayei, M., & Jalinoos, F. (2019). Foundation Reuse in Accelerated Bridge Construction. *Journal of Bridge Engineering*, 24(10).
- Gega, M. & Bozo, L. (2017). Analysis of Bridge Foundation Damage in Albania. *Procedia Engineering*, (189), 275-282.
- Безбабічева, О. І., Кірієнко, М. М., Черепньов, І. А., & Топчій, В. Л. (2016). Безпечна експлуатація та надійність мостових споруд на дорогах України як необхідні елементи транспортної логістики. *Інженерія природокористування*, 1(5), 29-39.
- Горбулін, В. П. (Ред.) (2017). *Світова гібридна війна: український фронт*. Київ: НІСД.
- Горбулін, В. П., Власюк, О. С., Лібанова, Е. М., & Ляшенко, О. М. (Ред.) (2015). *Донбас і Крим: ціна повернення*. Київ: НІСД.
- ДБН В.1.2-15:2009 (2009). *Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи*. Київ: Мінрегіонбуд України.
- Кваша, В. Г., & Салійчук, Л. В. (2013). Підсилення опор при реконструкції мостів. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції та будівлі*, 25, 739-753.
- Лантух-Ляшенко, А. І. (2004). *Технічний стан мостів і транспортних споруд України: Аналітична довідка Міжвідомчої комісії з питань науково технологічної безпеки*.
- Лантух-Ляшенко, А. І. (2008). Уточнення оцінки експлуатаційного стану мостів. *Дороги і мости*, 9, 12-18.
- Лист заступника начальника об'єднаного оператив-

ного штабу Збройних Сил України № 313/5/2313 від 24.03.2016 р. «Щодо кількості зруйнованих постійних мостових споруд та знищених механізованих мостів, які використовуються у Збройних Силах України для забезпечення подолання перешкод за час проведення антитерористичної операції на території Донецької та Луганської областей».

Марочка, В. В., & Бобошко, С. Г. (2018). Современные методы реконструкции мостовых сооружений. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 14, 15-21.

Шемаєв, В. В. (2018). *Теоретико-методологічні засади та пріоритети розвитку транспортної інфраструктури в системі економічної безпеки України*. Київ: НУОУ.

А. Л. ТЮТКИН^{1*}, И. С. ОСТАПЕНКО²

^{1*} 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

² Кафедра военной подготовки специалистов Госспецтрансслужбы, Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта, имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (068) 838 67 63, эл. почта igorostapenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2232-7138

УСИЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ МОСТОВ В КОНТЕКСТЕ ПРОБЛЕМНОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНО-ДОРОЖНОГО КОМПЛЕКСА

Цель. Целью работы является проведение анализа существующих отечественных и мировых методов усиления фундаментов автомобильных мостов с учетом влияния различных факторов и условий эксплуатации указанных объектов в контексте проблемного состояния транспортно-дорожного комплекса. **Методика.** Освещены проблемные вопросы обеспечения бесперебойного функционирования транспортных направлений в современных условиях. Определены комплексные меры, направленные на восстановление эксплуатации транспортной инфраструктуры путем оперативного реагирования на имеющиеся и возникающие угрозы вывода из строя транспортных направлений в результате военных действий, диверсий, стихийных бедствий, техногенных аварий. **Результаты.** Обобщение современных мировых и отечественных методов усиления фундаментов мостов предоставило возможность исследования наиболее эффективных, экономически выгодных и простых в технологическом исполнении конструкций. Предложены четыре направления развития усиления фундаментов: 1) увеличение площади опирания фундаментов мелкого заложения на естественных основаниях; 2) устройство дополнительных свайных фундаментов с объединением их в общую конструктивную систему с существующими фундаментами и сооружением дополнительных опор; 3) усиление существующих свайных фундаментов путем изменения несущей способности оснований; 4) устройство других конструктивных элементов для обеспечения усиления существующих фундаментов мостов. **Научная новизна.** Она заключается в постановке задачи усиления фундаментов автомобильных мостов в контексте проблемного состояния транспортно-дорожного комплекса. **Практическая значимость.** На основе результатов проведенного анализа можно рекомендовать наиболее экономически обоснованные и быстро реализуемые методы усиления фундаментов мостов для принятия проектных решений при реализации государственных программ строительства и развития транспортно-дорожного комплекса Украины и в современной мировой практике.

Ключевые слова: транспортно-дорожный комплекс; мост; фундамент; усиление; реконструкция; восстановление

О. Л. ТИУТКИН^{1*}, І. С. ОСТАПЕНКО²

^{1*} Department «Bridges and Tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

² Department of Military Training of specialists of the State Special Transport Service Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (068) 838 67 63, e-mail igorostapenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2232-7138

STRENGTHENING OF THE FOUNDATIONS OF HIGHWAY BRIDGES IN THE CONTEXT OF THE PROBLEMATIC STATE OF THE TRANSPORTATION AND ROAD COMPLEX

Purpose. The aim of the work is to analyze the existing domestic and foreign methods of strengthening the foundations of road bridges, taking into account the influence of various factors and operating conditions of these objects in the context of the problematic state of the transport and road complex. **Methodology.** The problematic issues of ensuring the smooth functioning of transport routes in modern conditions are highlighted. Complex measures aimed at restoring the operation of the transport infrastructure by promptly responding to existing and emerging threats of disabling transport routes as a result of military operations, sabotage, natural disasters, and man-made accidents have been identified. **Findings.** Generalization of modern foreign and domestic methods of strengthening the foundations of bridges made it possible to study the most effective, cost-effective and simple in technological design structures. Four directions of development of strengthening of foundations are proposed: 1) increasing the support area of shallow foundations on natural bases; 2) installation of additional pile foundations with their integration into a common structural system with existing foundations and the construction of additional supports; 3) strengthening the existing pile foundations by changing the bearing capacity of the foundations; 4) constructing other structural elements to ensure the reinforcement of the existing foundations of bridges. **Originality.** It consists in setting the task of strengthening the foundations of road bridges in the context of the problematic state of the transport and road complex. **Practical value.** Based on the results of the analysis, it is possible to recommend the most economically justified and quickly implemented methods of strengthening the foundations of bridges for making design decisions in the implementation of state programs for the construction and development of the transport and road complex of Ukraine and in modern world practice.

Keywords: transport and road complex; bridge; foundation; strengthening; reconstruction; restoration

REFERENCES

- Davis, N. T., Hoomaan, E., Agrawal, A. K., Sanayei, M., & Jalinoos, F. (2019). Foundation Reuse in Accelerated Bridge Construction. *Journal of Bridge Engineering*, 24(10). (in English)
- Gega, M. & Bozo, L. (2017). Analysis of Bridge Foundation Damage in Albania. *Procedia Engineering*, (189), 275-282. (in English)
- Bezbabicheva, O. I., Kirienko, M. M., Cherepnov, I. A., & Topchii, V. L. (2016). Bezpechna ekspluatatsiia ta nadiinist mostovykh sporud na dorohakh Ukrainy yak neobkhidni elementy transportnoi lohistyky. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, 1(5), 29-39. (in Ukrainian)
- Horbilin, V. P. (Red.) (2017). *Svitova hibrydna viina: ukrainskyi front*. Kyiv: NISD. (in Ukrainian)
- Horbilin, V. P., Vlasiuk, O. S., Libanova, E. M., & Liashenko, O. M. (Red.) (2015). *Donbas i Krym: tsina povernennia*. Kyiv: NISD. (in Ukrainian)
- DBN V.1.2-15:2009 (2009). *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennia i vplyvy*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Kvasha, V. H., & Saliichuk, L. V. (2013). Pidsylennia opor pry rekonstruktsii mostiv. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii ta budivli*, 25, 739-753. (in Ukrainian)
- Lantukh-Liashchenko, A. I. (2004). *Tekhnichniy stan mostiv i transportnykh sporud Ukrainy: Analichna dovidka Mizhvidomchoi komisii z pytan naukovy tekhnolohichnoi bezpeky*. (in Ukrainian)
- Lantukh-Liashchenko, A. I. (2008). Utochnennia otsinky ekspluatatsiinoho stanu mostiv. *Dorohy i mosty*, 9, 12-18. (in Ukrainian)
- Lyst zastupnyka nachalnyka obiednanoho operatyvnoho shtabu Zbroinykh Syl Ukrainy № 313/5/2313 vid 24.03.2016 r. «Shchodo kilkosti zruinovanykh postiinykh mostovykh sporud ta znyshchenykh mekhanizovanykh mostiv, yaki vykorystovuiutsia u Zbroinykh Sylakh Ukrainy dlia zabezpechennia podolannia pereshkod za chas provedennia antyterorystychnoi operatsii na terytorii Donetskoi ta Luhanskoi oblasti». (in Ukrainian)
- Marochka, V. V., & Boboshko, S. G. (2018). Sovremennyye metody rekonstruktsii mostovykh sooruzheniy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 14, 15-21. (in Russian)
- Shemaiev, V. V. (2018). *Teoretyko-metodolohichni zasady ta priorytety rozvytku transportnoi infrastruktury v systemi ekonomichnoi bezpeky Ukrainy*. Kyiv: NUOU. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 01.10.2020.

Прийнята до друку 30.10.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.159.4

А. І. ЮХИМЕНКО^{1*}, Р. В. САМЧЕНКО²

^{1*} Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, 69006, тел. +38 (095) 447 13 65, ел. пошта winner.wcar@gmail.com, ORCID 0000-0003-4231-9602

² Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, 69006, тел. +38 (050) 454 81 65, ел. пошта sektor3@ukr.net, ORCID 0000-0003-1013-0047

ЗАСАДИ МЕТОДУ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

Мета. Розробити засади узагальнюючого методу усунення деформованого стану будівель і споруд шляхом регулювання жорсткості основи фундаментів горизонтальними свердловинами змінних параметрів. **Методика.** Враховуючи, що в більшості випадків деформацій будівельних об'єктів виникають через нерівномірні осідання фундаментів із-за нерівномірних деформацій основ, при ліквідації деформацій доцільно йти шляхом нівелювання осідань фундаментів одним із технологічних прийомів – нерівномірним щілопоподібним вимиванням ґрунту основи із-під фундаменту стисненням струменем, нерівномірним ущільненням ґрунтів вібрацією та ін. Нами запропоновано бурінням горизонтальних свердловин змінних параметрів в шарі основи безпосередньо під фундаментом. **Результати.** На базі вказаної гіпотези запропонований на рівні винаходу спосіб вирівнювання нахилених будівель, споруд. Для його реалізації розроблений технологічний регламент, який полягає у геодезичних вимірюваннях кута нахилу об'єкту, горизонтального зміщення верху від вертикалі, визначення величини необхідного опускання менш осілої частини фундаменту бурінням горизонтальних свердловин. По розробленій методиці визначають параметри горизонтальних свердловин, по яким перфорується шар ґрунту під фундаментом. **Наукова новизна.** Обґрунтована можливість усунення деформованого стану будівель, споруд управлінням жорсткості основ фундаментів перфоруванням шару ґрунтів горизонтальними свердловинами змінних параметрів, при яких відбудовуються дзеркальні зворотні осідання фундаментів і, відповідно, будівля повертається в проектне положення. **Практична значимість.** Розроблений метод відновлення деформованого стану уніфікований. Метод застосовується для ліквідації деформацій об'єктів різних конструктивних форм: призматичних, круглих, баштових висотних, у т.ч. точкових (димових труб, силосних споруд). Ліквідація деформованого стану відбувається без відселення людей, без зупинки діяльності.

Ключові слова: деформації будівель; відновлення; осідання фундаменту; горизонтальні свердловини; перфорація

Вступ

Економіка багатьох країн світу страждає від наявності деформованих та аварійних будівельних об'єктів. При цьому деформації будівель, споруд відбуваються у різних формах – крени вигини, прогини, кручення та їх похідні – тріщиноутворення, зсуви із опорних поверхонь та ін. Причини виникнення деформованого стану різноманітні. Але найбільше вони виникають в регіонах із структурно-нестійкими ґрунтами – просадочними, набухаючими, мерзлими та ін.

На просадочних територіях України, які займають біля 70 % площі країни, внаслідок руйнування структури ґрунтів від замочування та навантаження від ваги об'єктів і власної ваги ґрунтів відбуваються суттєві деформації значної

кількості будівель та споруд різної форми пошкоджень (Яковлев, & Винников, 1992). Найбільш небезпечний вид деформацій є крени, особливо, коли суміжні будинки або їх блок-секції нахилиються назустріч один одному, де можуть виникати їх зіткнення із замиканням деформаційних швів. В разі неприйняття своєчасних запобіжних заходів виникають аварійні ситуації (рис. 1).

Значна кількість деформованих об'єктів існує також на кориснодобуваючих територіях, де через складні процеси деформування товщі ґрунтів внаслідок виїмки корисних копалин, практично неможливо запобігати впливу геотехнічних факторів на об'єкти (Розенва-сер, 2009).

Не менш небезпечними є крени висотних баштових споруд призматичної форми, та особливо точкових, наприклад димових труб (Вараница, 2001).



Рис. 1. Аварійний будинок № 6 по вул. Воронежській у м. Запоріжжя

Таким чином, по різних причинах виникають серйозні деформації будівель, споруд, де при перших проявах їх виникнення необхідно терміново в'ясувати причини та негайно їх усувати. В протилежному випадку при нехтуванні даною тезою деформації можуть стрімко розвиватися аж до аварійних ситуацій, про що сказано в багатьох джерелах інформації, але все-таки часто зустрічаються тяжкі наслідки (Емельянов, 1965; Ассоциация строительных вузов, 1995; Леденев, & Скрылев, 2002).

В зв'язку із значною кількістю деформованих об'єктів, які збільшуються у часі, вчені та спеціалісти розробляють та застосовують різноманітні засоби по ліквідації деформованих станів або ж зменшенню їх впливу на ступінь пошкодження будівель, споруд. Цьому сприяють методи та технології укріплення ґрунтів та зміцнення основ. В останні роки широко застосовують метод підсилення основ бурозмішувальними технологіями, які базуються на змішуванні ґрунту із укріплюючими розчинами, частіше із цементним (Lambert, Rocher-Lacoste, & Le Kouby, 2012; JianguoFan, 2015; Петренко, Тютюкін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2019). Більшість цих технологій направлені на утворення укріплюючих ґрунтоцементних армуючих елементів (ГЦЕ) у вертикальному напрямку (Зоценко, Бовкун, & Маля-

ренко, 2006). Але досить часто виникає необхідність укріплення ґрунтів у горизонтальному напрямку, наприклад для підсилення основ існуючих деформованих об'єктів.

Нами розроблений спосіб горизонтального укріплення ґрунтів основ армуванням горизонтальними ГЦЕ (Шокарев, Степура, І. В., & Степура, С. І., 2015), сутність та технологія яких показані в (Юхименко, 2016). Наведені способи та технології сприяють зменшенню кількості деформованих будівель, споруд, але вони не усувають вже виниклих деформацій будівель.

Мета

Надати основи розробленого узагальнюючого методу усунення деформованого стану будівель, споруд.

Методика

Аналіз розглянутих джерел інформації показує, що більшість випадків деформування будівель, споруд відбувається через нерівномірні осідання фундаментів із-за нерівномірних деформацій основ. Тому є сенс розглянути можливість ліквідації деформацій будівель, споруд, або хоч зменшення їх впливу на деформований стан шляхом нівелювання нерівномірності осідань фундаментів. Вирівнювання деформацій основи і тим самим здійснення нівелювання осідань фундаментів можливо виконати бурінням горизонтальних свердловин перемінних параметрів в шарі основи під фундаментом, що адекватно зміні жорсткості основи. Жорсткість основи є мірило деформаційної характеристики основи, що вказує на її здатність чинити опір переміщенню, або, навпаки, оцінювати умови можливості переміщення при певних обставинах (Клепиков, Трегуб, & Матвеев, 1987). Під тиском будівлі та додаткового технологічного впливу зволоженням ґрунтів у ціликах та зводах між свердловинами перфорований шар основи, досягаючи межі міцності руйнується та піддається деформації стиску у відповідності до параметрів горизонтальних свердловин, методика розрахунків яких показана в (Самченко, 2013).

Результати

На основі даної гіпотези нами запропонований спосіб вирівнювання нахилених будівель (патент України №65455 А) (Степура, І. В.,

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Шокарев, Павлов, & Трегуб, 2003). Сутність даного способу викладена в роботі (Самченко, Юхименко, & Степура, 2014) (рис. 2).

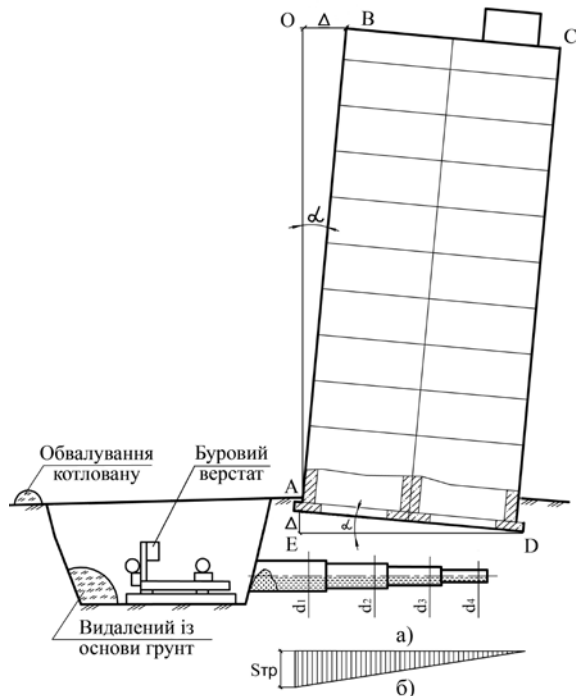


Рис. 2. Технологічна схема усунення поперечного крену:

а) параметри поперечного крену і свердловини змінних параметрів; б) епюра осідання фундаментів

Для реалізації способу відновлювання деформованого стану передбачений технологічний регламент, який полягає в наступному. Геодезичними методами – теодолітною зйомкою та геодезичним нівелюванням відзначають параметри нахилу будівлі – кут нахилу α і лінійне відхилення від вертикалі Δ . По цим даним із подібності трикутників АОВ та АЕД визначають величину необхідного осідання ребра будівлі АВ на величину АЕ призми ґрунту АДЕ, який заважає зайняти горизонтальне положення фундаменту, тобто лінія АД повинна співпасти із ЕД. Призму ґрунту АДЕ необхідно видалити із-під фундаменту бурінням горизонтальних свердловин, параметри яких визначають по методиці, викладеній в роботі (Самченко, 2013). По визначених параметрах розробляють проект вирівнювання будівлі.

По вказаній методиці визначають параметри перфорування горизонтальними свердловинами шару основи будівель, споруд, фундаменти яких

при осіданнях не викривляються, а осідають по лінійній закономірності.

Окрім ліквідації кренів, наведеною технологією можна усувати деформації вгинів, прогинів, будівель, фундаменти яких при нерівномірних осіданнях викривляються по одній із функцій параболи, гіперболи або іншим закономірностям (Павлов, & Степура, 2006). Це будівлі кінцевої жорсткості, наприклад цегляні на збірних фундаментах із фундаментних подушок. Параметри перфорування горизонтальними свердловинами таких будівель визначають по емпіричним залежностям, отриманих шляхом обробки результатів експериментальних даних методом математичної статистики.

Усунення деформованого стану будівель, споруд методом управління жорсткістю основ фундаментів перевірено при його успішному впровадженні на 60 об'єктах різних конструктивних схем, в різних ґрунтових умовах зв'язних ґрунтів у вигляді штучних, ущільнених, водонасичених основ в різних регіонах України. В жодному випадку не посилювались деформації будівель, споруд, не виникали надзвичайні ситуації при відновленні деформаційних станів. Роботи виконувались без відселення мешканців та без зупинки діяльності об'єктів. Вище наведене свідчить про ефективність та достовірність методу. Можна було б навести достатню кількість прикладів впровадження, але через вимоги обмеження самоцитатування наведемо лише два приклади успішного вирівнювання нахилених димових труб висотою 40...1000 м (Самченко, 2014), або про ліквідацію деформованого стану будівель, споруд у водонасичених умовах (Юхименко, 2019).

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано метод відновлення деформованого стану будівельних об'єктів шляхом регулювання жорсткості основи фундаментів горизонтальними свердловинами змінних параметрів, новизна якого захищена патентом. Практична значимість обумовлена достатньою кількістю відновлених деформованих об'єктів різного призначення в різних регіонах України.

Висновки

1. На базі проведених досліджень обґрунтована можливість усунення деформованого стану будівель, споруд управлінням жорсткістю основ

фундаментів перфоруванням шару ґрунту горизонтальними свердловинами змінних параметрів.

2. Розроблений метод відновлення деформованих будівель, споруд уніфікований: по-перше, він придатний для ліквідації деформацій різних конструктивних схем; по-друге, даний метод дозволяє усувати різні види деформацій – крени, прогини, вигини, роз'єднання зіткнених будівель або їх блок-секцій при замиканні деформаційних швів.

3. Достовірність, простота та ефективність методу підтверджені при вдалому впровадженні на 60 об'єктах в різних регіонах України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- JianguoFan. (2015). Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10, 791-797.
- Lambert, S., Rocher-Lacoste, F. & Le Kouby, A. (2012). Soil-cement columns, an alternative soil improvement method. *Recent research, advances and execution aspects of ground improvement works*, 8, 52-59.
- Ассоциация строительных вузов. (1995). *Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий*. Москва: Стройиздат.
- Вараница, В. В. (2001). О кренах кирпичных дымовых труб. *Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури*, 5, 101-102.
- Емельянов, А. А. (1965). Деформации и повреждения зданий из объемных блоков. *Анализ причин аварий и поврежденных строительных конструкций*, 3, 84 – 108.
- Зоценко, М. Л., Бовкун, Ж. М., & Маляренко, В. І. (2006). Досвід і перспективи підсилення основ вертикальними ґрунтоцементними елементами у міському будівництві. *Бетон и железобетон в Украине*, 6, 24-28.
- Клепиков, С. Н., Трегуб, А. С., & Матвеев, И. В. (1987) *Расчет зданий и сооружений на просадочных грунтах*. Київ: Будівельник.
- Леденев, В. В., & Скрылев, В. И. (2002). *Предупреждение аварий*. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов.
- Павлов, І. Д., & Степура, І. В. (2006). Патент України

95510. Київ: Державне патентне відомство України.
- Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., Крисан, В. І., & Крисан, В. В. (2019). Відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням ґрунтоцементними елементами. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 65-74.
- Розенвасер, Г. Р. (2009). Развитие конструктивных мер защиты зданий и сооружений, строящихся в особо сложных геотехнических условиях. *Современные проблемы строительства*, 5, 63-72.
- Самченко, Р. В., Юхименко, А. І., & Степура, І. В. (2014). Про геотехнології відновлення деформованих будівель та забезпечення їх подальшої нормальної експлуатації. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*, 148, 70-76.
- Самченко, Р. В. (2014). Особливості технології усунення кренів димових труб регулюванням жорсткістю основ. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*, 148, 76-82.
- Самченко, Р. В. (2013). Методика розрахунку параметрів вирівнювання нахилених будівель. *Збірник наукових праць (галузевого машинобудування, будівництва)*, 3(38), 321-327.
- Степура, І. В., Шокарев, В. С., Павлов, А. В., & Трегуб, А. С. (2003). Патент України 65455А. Київ: Державне патентне відомство України.
- Шокарев, В. С., Степура, І. В., & Степура, С. І. (2015). Патент України 101409. Київ: Державне патентне відомство України.
- Юхименко, А. І. (2016). Дослідження процесів утворення горизонтальних армоелементів для укріплення ґрунтів основ споруд за бурозмішувальною технологією. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 10, 98-106.
- Юхименко, А. І. (2019). Ліквідація деформованого стану будівель, споруд у водонасичених умовах. *Вісник одеської державної академії будівництва та архітектури*, 75, 151-157.
- Яковлев, А. В., & Винников, Ю. Л. (1992). *Особенности проектирования, строительства, эксплуатации зданий и сооружений на лесовом грунте та зсувонебезпечній території України*. Київ: НМК ВО.

А. І. ЮХИМЕНКО^{1*}, Р. В. САМЧЕНКО²

^{1*} Кафедра промышленного и гражданского строительства, Запорожский национальный университет, пр. Соборный, 226, г. Запорожье, 69006, тел. +38 (095) 447 13 65, эл. почта winner.wcar@gmail.com, ORCID 0000-0003-4231-9602

² Кафедра промышленного и гражданского строительства, Запорожский национальный университет, пр. Соборный, 226, г. Запорожье, 69006, тел. +38 (050) 454 81 65, эл. почта sektor3@ukr.net, ORCID 0000-0003-1013-0047

ОСНОВЫ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Цель Разработать основы обобщающего метода устранения деформированного состояния зданий и сооружений путем регулирования жесткости основания фундаментов горизонтальными скважинами переменных параметров. **Методика.** Учитывая, что большинство случаев деформаций строительных объектов происходят вследствие неравномерных осадок фундаментов из-за неравномерных деформаций оснований, при ликвидации деформаций целесообразно идти по пути нивелирования осадок фундаментов одним из технологических приемов – неравномерным щелеобразным вымыванием грунта основания из-под фундамента сжатой струей, неравномерным уплотнением грунтов вибрацией и др. Нами предложено бурение горизонтальных скважин переменных параметров в слое основания непосредственно под фундаментом. **Результаты.** На базе указанной гипотезы предложен на уровне изобретения способ выравнивания наклоненных зданий, сооружений. Для его реализации разработан технологический регламент, который заключается в геодезических измерениях угла наклона объекта, горизонтального смещения верха от вертикали, определение величины необходимого опускания менее осевшей части фундамента бурением горизонтальных скважин. По разработанной методике определяют параметры горизонтальных скважин, по которым перфорируют слой грунта под фундаментом. **Научная новизна.** Обоснована возможность устранения деформированного состояния зданий, сооружений управлением жесткости оснований фундаментов перфорированием слоя грунта горизонтальными скважинами переменных параметров, при которых восстанавливаются зеркальные обратные осадки фундаментов и, соответственно, здание возвращается в проектное положение. **Практическая значимость.** Разработанный метод восстановления деформированного состояния унифицирован. Метод применяется для ликвидации деформаций объектов различных конструктивных форм: призматических, круглых, башенных высотных, в т.ч. точечных (дымовых труб, силосных сооружений). Ликвидация деформированного состояния происходит без отселения людей, без остановки деятельности.

Ключевые слова: деформации зданий; восстановление; осадки фундамента; горизонтальные скважины; перфорация

A. I. YUKHYMENKO^{1*}, R. V. SAMCHENKO²

^{1*} Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporozhye National University, 226 Soborny Ave., Zaporozhye, 69006, tel. +38 (095) 447 13 65, e-mail winner.wcar@gmail.com, ORCID 0000-0003-4231-9602

² Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporozhye National University, 226 Soborny Ave., Zaporozhye, 69006, tel. +38 (050) 454 81 65, email mail sektor3@ukr.net, ORCID 0000-0003-1013-0047

BASICS OF THE METHOD FOR RESTORING THE DEFORMED STATE OF CONSTRUCTION OBJECTS

Purpose. To develop bases of the generalizing method of elimination of a deformed condition of buildings and constructions by regulation of rigidity of the basis of the bases by horizontal wells of variable parameters. **Methodology.** Considering that most cases of deformations of construction objects receive deformations due to uneven settlement of foundations due to uneven deformations of the bases, when eliminating deformations, it is advisable to follow the path of leveling the settlement of foundations by one of the technological methods – uneven crevice-like leaching of the foundation soil from under the foundation by a compressed jet, uneven soil compaction by vibration, etc. We have proposed drilling horizontal wells with variable parameters in the base layer directly under the foundation. **Results.** On the basis of this hypothesis, a method for leveling inclined buildings and structures is proposed at the level of the invention. For its implementation, a technological regulation has been developed, which consists in geodetic measurements of the angle of inclination of the object, horizontal displacement of the top from the vertical, determining the value of the required lowering of the less settled part of the foundation by drilling horizontal wells. According to the developed technique, the parameters of horizontal wells are determined, through which the soil layer under the foundation is perforated. **Originality.** The possibility of eliminating the deformed state of buildings and structures by controlling the stiffness of the foundations by perforating the soil layer with horizontal wells of variable parameters is substantiated, at which the mirror reverse settlement of the foundations is restored and, accordingly, the building returns to the design position. **Practical value.** The developed method for restoring the

deformed state is unified. The method is used to eliminate deformations of objects of various structural forms: prismatic, round, tower high-rise, incl. point (chimneys, silos). The elimination of the deformed state occurs without resettling people, without stopping activity.

Keywords: building deformations; restoration; foundation settlement; horizontal wells; perforation

REFERENCES

- JianguoFan. (2015). Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10, 791-797. (in English)
- Lambert, S., Rocher-Lacoste, F. & Le Kouby, A. (2012). Soil-cement columns, an alternative soil improvement method. *Recent research, advances and execution aspects of ground improvement works*, 8, 52-59. (in English)
- Assotsiatsiya stroitelnykh vuzov. (1995). *Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)
- Varanitsa, V. V. (2001). O krenakh kirpichnykh dymovykh trub. *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi akademii budivnytstva i arkhitektury*, 5, 101-102. (in Russian)
- Yemelyanov, A. A. (1965). Deformatsii i povrezhdeniya zdaniy iz obemnykh blokov. *Analiz prichin avariiv i povrezhdeniy stroitelnykh konstruksiy*, 3, 84 – 108. (in Russian)
- Zotsenko, M. L., Bovkun, Zh. M., & Maliarenko, V. I. (2006). Dosvid i perspektyvy pidsylennia osnov vertykalnymi gruntotsementnymi elementami u miskomu budivnytstvi. *Beton i zhelezobeton v Ukraini*, 6, 24-28. (in Ukrainian)
- Klepikov, S. N., Tregub, A. S., & Matveev, I. V. (1987) *Raschet zdaniy i sooruzheniy na prosadochnykh gruntakh*. Kiev: Budivelnik. (in Russian)
- Ledenev, V. V., & Skrylev, V. I. (2002). *Preduprezhdenie avariiv*. Moskva: Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov. (in Russian)
- Pavlov, I. D., & Stepura, I. V. (2006). Patent Ukrainy 95510. Kyiv: Derzhavne patentne vidomstvo Ukrainy. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Krysan, V. I., & Krysan, V. V. (2019). Vidnovlennia mitsnosnykh ta deformatyvnykh kharakterystyk zemlianoho polotna ta yoho osnovy armuvanniam gruntotsementnymi elementami. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 65-74 (in Ukrainian)
- Rozenvaser, G. R. (2009). Razvitie konstruktivnykh mer zashchity zdaniy i sooruzheniy, stroyashchikhsya v osobo slozhnykh geotekhnicheskikh usloviyakh. *Sovremennye problemy stroitelstva*, 5, 63-72. (in Russian)
- Samchenko, R. V., Yukhymenko, A. I., & Stepura, I. V. (2014). Pro heotekhnologii vidnovlennia deformovanykh budivel ta zabezpechennia yikh podalshoi normalnoi ekspluatatsii. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainiskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*, 148, 70-76. (in Ukrainian)
- Samchenko, R. V. (2014). Osoblyvosti tekhnologii usunennia kreniv dymovykh trub rehuliuivanniam zhorstkistiu osnov. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainiskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*, 148, 76-82. (in Ukrainian)
- Samchenko, R. V. (2013). Metodyka rozrakhunku parametriv vyrivniuvannia nakhylenykh budivel. *Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo)*, 3(38), 321-327. (in Ukrainian)
- Stepura, I. V., Shokarev, V. S., Pavlov, A. V. , & Trehub, A. S. (2003). Patent Ukrainy 65455A. Kyiv: Derzhavne patentne vidomstvo Ukrainy. (in Ukrainian)
- Shokarev, V. S., Stepura, I. V., & Stepura, S. I. (2015). Patent Ukrainy 101409. Kyiv: Derzhavne patentne vidomstvo Ukrainy. (in Ukrainian)
- Yukhymenko, A. I. (2016). Doslidzhennia protsesiv utvorennia horyzontalnykh armoelementiv dlia ukriplennia gruntiv osnov sporud za burozmishuvalnoiu tekhnolohiieiu. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 10, 98-106. (in Ukrainian)
- Yukhymenko, A. I. (2019). Likvidatsiia deformovanoho stanu budivel, sporud u vodonasychenykh umovakh. *Visnyk odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, 75, 151-157. (in Ukrainian)
- Yakovliev, A. V., & Vynnykov, Yu. L. (1992). *Osoblyvosti proektuvannia, budivnytstva, ekspluatatsii budivel i sporud na lesovomu grunti ta zsvonebezpechnii terytorii Ukrainy*. Kyiv: NMK VO. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 06.09.2020.

Прийнята до друку 09.10.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

UDC 624.21.012.4

D. N. SMERDOV¹, M. O. YASHCHUK^{2*}

¹ SibNII bridge, Siberian Transport University, str. Dusi Kovalchuk, 191, Novosibirsk, Russia, 630049, e-mail dnsmerdov@mail.ru, ORCID 0000-0003-2022-4565

^{2*} Department «Research, design and construction of railways», Rostov State Transport University, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2, Rostov-on-Don, Russia, 344038, e-mail maxum1986@gmail.com, ORCID 0000-0003-3670-2795

LABORATORY STUDIES OF PRESTRESS LOSS WHEN REINFORCING REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH COMPOSITE MATERIALS

Purpose. The article analyzes a scientific experiment to study the loss of prestressing when reinforcing reinforced concrete bending elements with composite materials. **Methodology.** To achieve this goal, the authors carried out experimental work in the scientific laboratory “Bridges” SibNII of STU, using the developed amplification technology. The object of study is three reinforced concrete twin beams with a prestressing degree of the composite material of 12 kN. Losses were measured over a period of 180 hours, from the beginning of the prestressing moment for each beam separately. **Findings.** After analyzing the laboratory experiment, three characteristic zones were identified with a decrease in the prestress value: “Primary zone”, “Moderate zone” and “Relaxation zone”, in which the magnitude of the prestress of the composite material changes within different limits. **Originality.** The average value of the loss of prestress of bending reinforced concrete elements during the strengthening of laboratory samples is found. **Practical significance.** Analysis of the loss of the prestress value is an important factor in the further study of the calculation methodology and improvement of the technology for reinforcing reinforced concrete structures with composite materials.

Keywords: prestressed polymer composite materials; bridges; strengthening; reinforced concrete beam; hydraulic jack; improving and restoring the bearing capacity; span structures

Introduction

The use of polymer composite materials (FRP) when reinforcing bridges makes it possible to carry out repair work with a material that actually has a low weight, which means that it reduces the labor intensity and cost of work, while increasing the convenience of work. Due to the structure of polymer composites (fabric), it is possible to carry out reinforcement and repair work without interrupting the operation of the bridge.

The high impact-resistant characteristics of polymer composites make it possible to compensate for the absence of a protective layer, which reduces the cost of maintaining the bridge. There is a possibility of using FRP in contact with water or with high humidity, since, for example, FRP based on carbon fibers have high corrosion resistance. This makes this material one of the best for bridge maintenance and repair (Michels, 2013; Harmanci, 2016; Harmanci, 2018a; Harmanci, 2018b).

A FRP casing impregnated with a special adhesive has a high chemical resistance, which prevents the removal of the joints responsible for strength from concrete, and also prevents the accumulation of salts in concrete, leading to degradation and a rapid decrease in the strength of concrete.

At the same time, an increasing time load, concrete degradation, corrosion of reinforcement and damage to structural elements often lead to the need to strengthen reinforced concrete bridge spans. Over the past years in Russia, polymer composite materials are increasingly used to strengthen bridge structures, deep scientific developments have been carried out, and technologies for strengthening polymer composite materials are being introduced into practice. To increase the efficiency of FRP reinforcement, the technology of restoring the bearing capacity of spans with preliminary stressing of composite materials can be used (Sena-Crus, 2015; Бокарев, 2016; Казарян, 2018; Марочка, & Бобошко, 2018; Плевков, 2017).

Purpose

Analysis, taking into account the losses in time of the prestressing force when reinforcing bendable reinforced concrete elements with an external reinforcement system based on polymer composite materials, based on the laboratory testing of reinforced concrete specimens with a rectangular cross section, for subsequent use in the practice of strengthening the beams of the span structure of bridges made not of prestressed reinforced concrete.

Methodology

To solve the set tasks of experimental laboratory Research, reinforced concrete beams of rectangular section were chosen as samples to be tested. Figure 1 shows a reinforcement drawing of reinforced concrete specimens made of concrete of class B30, frost resistance grade F200, water resistance grade W6.

For the reinforcement of reinforced concrete samples, the materials of the COMPOSIT company were chosen – FibArm Lamel HS 12/50; epoxy adhesive composition FibArm Resin Laminate +.

Below are the technical characteristics of composite reinforcement material:

1. Width 50 mm;
2. Thickness 1.2 mm;
3. Strength at break 3500 MPa;
4. The modulus of elasticity is 170 GPa.

Also presented are the technical characteristics of the adhesive for strengthening beams:

1. The shear strength of the glue samples is not less than 15 MPa;
2. Time of complete hardening 5 days;
3. Adhesion strength not less than 2.5 MPa.

The amplification technology with pre-voltage FRP provides for the following types of work:

a) leveling the surface of the reinforced concrete beam on which the FRP is glued. The permissible deviations from the flatness of the surface should not exceed 1 mm on the basis of 0.3 m.

b) drilling holes for anchoring the hydraulic jack frame and fixing the fixed end of the FRP plate;

c) cleaning, dedusting and degreasing the surface of the beam.

d) installation in the anchoring of the frame of the hydraulic jack.

e) applying epoxy glue to the surface of the beam with a layer of 1...2 mm.

f) the sticker of the plate begins with preparatory work, it is laid out on the working table (workbench) and carefully wiped with a cloth moistened with acetone. After that, on an absolutely dry surface of the plate, a triangular profile is formed from the adhesive using a specially made dispenser (conductor) or trowel, while the thickness of the adhesive layer in the middle should be 2 mm, narrowing towards the edges to 1 mm. After applying the adhesive, the lamella is placed on the base and rolled with a rigid roller to remove air from the adhesive layer. Remove excess adhesive with a spatula.

g) fixing the fixed end of the FRP plate.

h) tension of the FRP strip with a jack to the design level;

i) warming up the adhesive composition to accelerate its polymerization (no longer than three hours);

j) dismantling the prestressing system (24 hours after the end of the warm-up).

On the basis of the calculations and analysis of the work of the structures, the samples were divided into four groups (designated by the letters A, B, C, D), three twin beams in each group. The first group of samples A is represented by unreinforced reinforced concrete beams. The second group B – with reinforced concrete beams, reinforced with unstressed plates, fixed with vertical FRP clamps. In the third group, samples C were reinforced with the first level of FRP prestress up to 6 kN. In the fourth group D – the second prestressing level up to 12 kN.

This study analyzes the data on prestressing losses in a group of samples with a prestressing level of 12 kN. The beam reinforcement scheme with geometric dimensions is shown in Figure 2.

The control over the force in the plate of the polymer composite material directly during the amplification of laboratory samples and during the next 180 hours was carried out mainly using the multichannel measuring complex TDS-150 with primary transducers – strain gauges. A beam with a FRP prestressing system and glued strain gauges connected to the TDS-150 multichannel complex are shown in Figure 3.

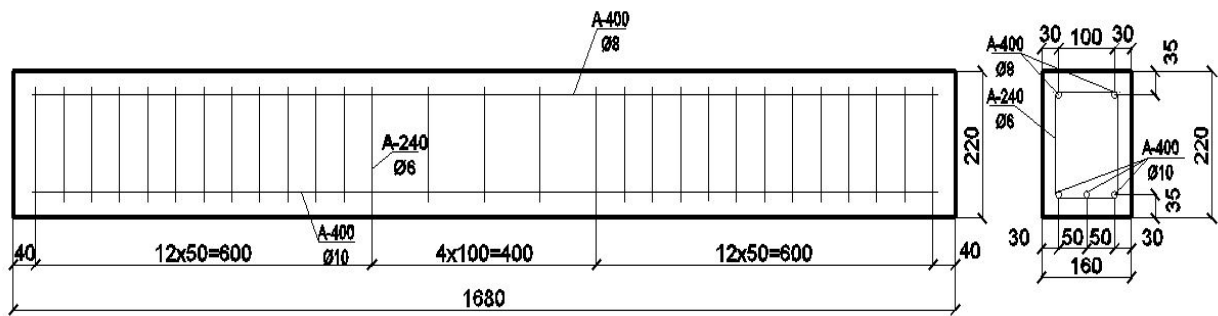


Fig. 1. Reinforcement scheme for a reinforced concrete laboratory sample (Ящук, 2017a; Ящук, 2017b)

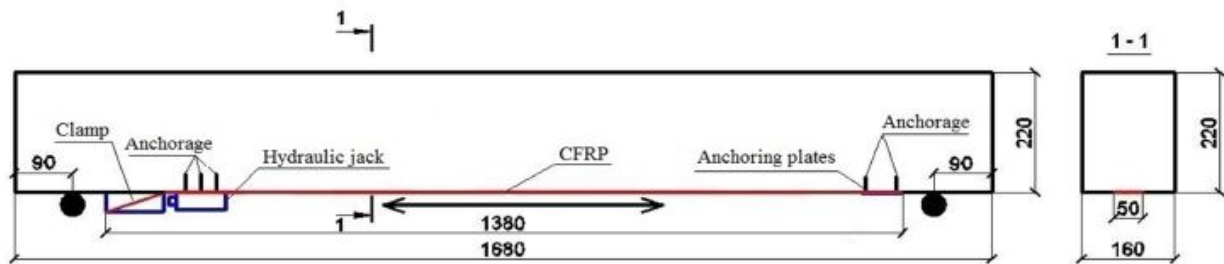


Fig. 2. Beam reinforcement

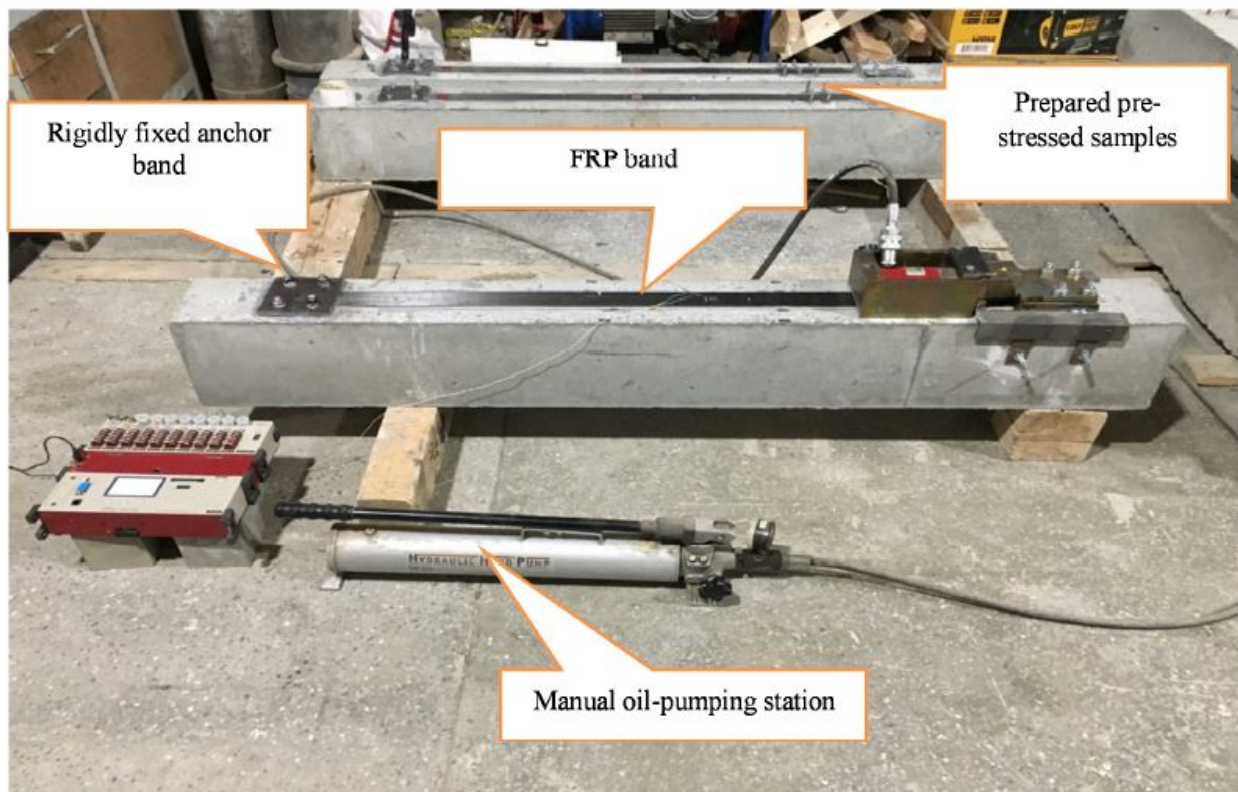


Fig. 3. Scheme of work of the TDS-150 to control the loss of prestressing, when reinforcing the FRP of a reinforced concrete beam

Measurement of the voltage level is carried out by the “Interval measurement” function – with the help of which the measurement data is automatically recorded during the set time

intervals. From the moment the prestressing of the FRP plate began and until the expiration of 24 hours, in the first 5 hours of time, the voltage level was measured every 1 second. In the period from 5 hours to 24 hours, the voltage was measured every 10 minutes. After dismantling the prestressing system of polymer composite materials (after 24 hours), the measurement in the following days up to 180 hours occurred at intervals of once every 60 minutes. In the study of the drop in prestressing level, three programmed intervals of time measurements were applied, which were performed sequentially. To compensate for additional measurement errors, a built-in method of full deformation compensation is used, which prevents jumps and additional errors in the event that the measured value is unstable, for example, from temperature influences.

Results

The results of the experiment show that a sharp decrease in the prestressing level of the FRP plate occurs in the interval of the first 24 hours and

amounts to about 16 MPa for sample No. 2, in the region of 10.5 MPa, a decrease in stress according to sample No. 2 and a drop in the prestress level in sample No. 3 was equal to 13.5 MPa. (Смердов, 2019).

The first zone of the prestress drop in the FRP plate can be called conditionally "Primary zone". The time interval between 24 hours and 70 hours will be called the "Temperate zone" in which there is a smooth drop in the prestressing level of the glued composite, in which sample No. 1 loses 8 MPa compared to the boundary value in the "Primary zone". Based on the data, the same boundary data in the previous zone, sample No. 2 showed a greater decrease in prestress equal to 13.5 MPa. Average indicators of prestress reduction for sample No. 3, which amounted to 11.5 MPa.

The conventionally introduced name "Relaxation zone" is the zone in which the prestress indicators in the FRP plate are stable for a long time, regardless of the temperature effect. The above values are shown in the diagram in Figure 4.

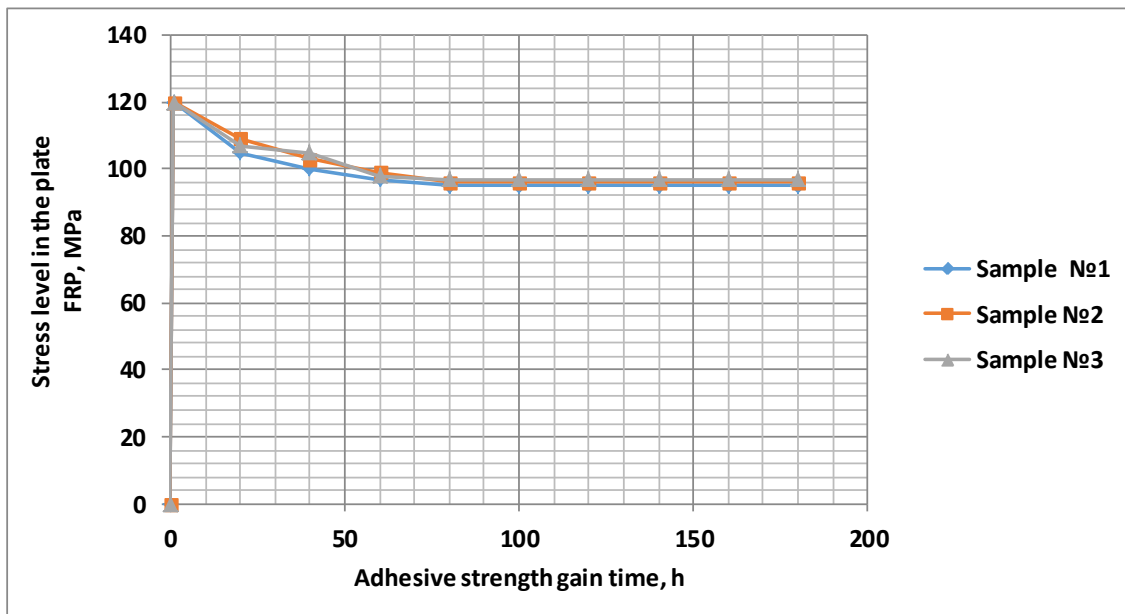


Fig. 4. Diagram of the loss of prestress in time in a FRP plate, with reinforcement of laboratory reinforced concrete specimens

Originality and practical value

The problem of the loss of magnitude, from the initial level of prestressing of the composite material when reinforcing reinforced concrete

bending elements, is important in relation to the further improvement of the calculation methodology and design of the reinforcement system. With the help of the applied prestressing system, it was possible to achieve minimum losses

based on a given tension level, while a sample consisting of three samples with a force of 12 kN allows us to speak of the practical significance of this laboratory study.

Conclusions

The article analyzes the study of the loss of prestress in time. The average losses for the three beams in the samples before the start of the "Relaxation Zone" were about 22.5 MPa, which is 18.7%. These indicators allow us to conclude that the developed and applied prestressing system is quite efficient.

REFERENCES

- Harmanci, Y. E. (2018a). Long-term residual anchorage resistance of gradient anchorages for prestressed CFRP strips. *Composites Part B: Engineering*, 139, 171-184.
- Harmanci, Y. E. (2018b). Behaviour of Prestressed CFRP Anchorages during and after Freeze-Thaw Cycle Exposure. *Polymers*, 10(6), 565.
- Harmanci, Y. E., & Czaderski, C. (2016). Calculation technique for externally unbonded CFRP strips in structural concrete retrofitting. *Journal of Engineering Mechanics*, 142(6), 04016026.
- Michels, J. (2013). Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage. *Journal of Composites for Construction*, 5(17), 651-661.
- Sena-Crus, J. (2015). Flexural Strengthening of RC Slabs with Prestressed CFRP Strips Using Different Anchorage Systems. *Polymers*, 7(10), 2100-2118.
- Бокарев, С. А., & Ящук М. О. (2016). Усиление железобетонных пролетных строений мостов преднапряженными полимерными композиционными материалами. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*, 1(61), 98-107.
- Казарян, В. Ю., & Сахарова, И. Д. (2018). Современные методы реконструкции мостовых сооружений. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 14, 6-14.
- Марочка, В. В., & Бобошко, С. Г. (2018). Современные методы реконструкции мостовых сооружений. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 14, 15-21.
- Плевков, В. С. (2017). К определению расчетных напряжений в стальной и углекомпонитной арматуре нормальных сечений железобетонных элементов. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*, 1(60), 96-113.
- Смердов, Д. Н., & Ящук, М. О. (2019). Экспериментальные исследования несущей способности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных преднапряженными полимерными композиционными материалами. *Научный журнал строительства и архитектуры*, 3(55), 72-83.
- Ящук, М. О. (2017а). Особенности работы устройств для усиления конструкций железобетонных мостов с применением полимерных композиционных материалов. Труды международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство-2016». Ростов-на-Дону, 3. 142-145.
- Ящук, М. О. (2017b). Программа лабораторных исследований железобетонных балок, усиленных преднапряженными полимерными композиционными материалами. *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*, 3, 158-170.

Д. М. СМЕРДОВ¹, М. О. ЯЩУК^{2*}

¹ Сібі́рський Мостів, Сибірський державний університет шляхів сполучення, вул. Дусі Ковальчук 191, Новосибірськ, Росія, 630049, ел. пошта dnsmerdov@mail.ru, ORCID 0000-0003-2022-4565

^{2*} Кафедра «Вишукування, проектування і будівництво залізниць», Ростовський державний університет шляхів сполучення, Площа Ростовського Стрілецького Полку Народного Ополчення, д. 2., Ростов-на-Дону, Росія, 344038 ел. пошта maxum1986@gmail.com, ORCID 0000-0003-3670-2795

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТИ ПОПЕРЕДНЬОГО НАПРУЖЕННЯ ПРИ ПІДСИЛЕННІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК КОМПОЗИЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Мета. У статті виконаний аналіз наукового експерименту з вивчення втрат попереднього напруження при підсиленні композиційними матеріалами залізобетонних елементів, що згинаються. **Методика.** Для

досягнення поставленої мети авторами була проведена експериментальна робота в науковій лабораторії «Мости» СГУПС, із застосуванням розробленої технології посилення. Об'єктом вивчення були три залізобетонних балки-близнючки зі ступенем попереднього напруження композиційного матеріалу 12 кН. Вимірювання втрат проводилося протягом 180 годин з початку моменту попереднього напруження для кожної балки окремо. **Результати.** Після аналізу проведеного лабораторного експерименту було виділено три характерні зони при зменшенні величини попереднього напруження: «Первинна зона», «Помірна зона» і «Зона релаксації», в яких в різних межах змінюється величина попереднього напруження композиційного матеріалу. **Наукова новизна.** Знайдена середня величина втрати попереднього напруження залізобетонних елементів, що згинаються, при підсиленні лабораторних зразків. **Практична значимість.** Аналіз втрати величини попереднього напруження є важливим фактором у подальшому вивченні методики розрахунку і вдосконалення технології підсилення залізобетонних конструкцій композиційними матеріалами.

Ключові слова: попередньо напружені полімерні композиційні матеріали; мости; підсилення; балка залізобетонна; домкрат гідравлічний; поліпшення і відновлення несучої здатності; прогонові будови

Д. Н. СМЕРДОВ¹, М. О. ЯЩУК^{2*}

¹ СибНИИ Мостов, Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук 191, Новосибирск, Россия, 630049, эл. почта dnsmerdov@mail.ru, ORCID 0000-0003-2022-4565

^{2*} Кафедра «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог», Ростовский государственный университет путей сообщения, Площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2., Ростов-на-Дону, Россия, 344038, эл. почта maxum1986@gmail.com, ORCID 0000-0003-3670-2795

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРИ ПРЕДНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ УСИЛЕНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Цель. В статье сделан анализ научного эксперимента по изучению потерь предварительного напряжения при усилении железобетонных изгибаемых элементов композиционными материалами. **Методика.** Для достижения поставленной цели авторами была проведена экспериментальная работа в научной лаборатории «Мосты» СГУПС, с применением разработанной технологии усиления. Объектом изучения являются три железобетонных балки-близнеца со степенью преднапряжения композиционного материала 12 кН. Измерение потерь проводилось в течение 180 часов с начала момента преднапряжения для каждой балки по отдельности. **Результаты.** После анализа проведенного лабораторного эксперимента было выделено три характерные зоны при уменьшении величины преднапряжения: «Первичная зона», «Умеренная зона» и «Зона релаксации», в которых в разных пределах изменяется величина преднапряжения композиционного материала. **Научная новизна.** Найдена средняя величина потери преднапряжения изгибаемых железобетонных элементов при усилении лабораторных образцов. **Практическая значимость.** Анализ потери величины преднапряжения является важным фактором в дальнейшем изучении методики расчета и совершенствования технологии усиления железобетонных конструкций композиционными материалами.

Ключевые слова: предварительно напряженные полимерные композиционные материалы; мосты; усиление; балка железобетонная; домкрат гидравлический; улучшение и восстановление несущей способности; пролетные строения

REFERENCES

- Harmanci, Y. E. (2018a). Long-term residual anchorage resistance of gradient anchorages for prestressed CFRP strips. *Composites Part B: Engineering*, 139, 171-184. (in English)
- Harmanci, Y. E. (2018b). Behaviour of Prestressed CFRP Anchorages during and after Freeze-Thaw Cycle Exposure. *Polymers*, 10(6), 565. (in English)
- Harmanci, Y. E., & Czaderski, C. (2016). Calculation technique for externally unbonded CFRP strips in structural concrete retrofitting. *Journal of Engineering Mechanics*, 142(6), 04016026. (in English)
- Michels, J. (2013). Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage. *Journal of Composites for Construction*, 5(17), 651-661. (in English)

- Sena-Crus, J. (2015). Flexural Strengthening of RC Slabs with Prestressed CFRP Strips Using Different Anchorage Systems. *Polymers*, 7(10), 2100-2118. (in English)
- Bokarev, S. A., & Yashchuk M. O. (2016). Usilenie zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy mostov prednapryazhennymi polimernymi kompozitsionnymi materialami. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 1(61), 98-107. (in Russian)
- Kazaryan, V. Yu., & Sakharova, I. D. (2018). Sovremennye metody rekonstruktsii mostovykh sooruzheniy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 14, 6-14. (in Russian)
- Marochka, V. V., & Boboshko, S. G. (2018). Sovremennye metody rekonstruktsii mostovykh sooruzheniy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 14, 15-21. (in Russian)
- Plevkov, V. S. (2017). K opredeleniyu raschetnykh napryazheniy v stalnoy i uglekompozitnoy armature normalnykh secheniy zhelezobetonnykh elementov. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 1(60), 96-113. (in Russian)
- Smerdov, D. N., & Yashchuk, M. O. (2019). Eksperimentalnye issledovaniya nesushchey sposobnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh prednapryazhennymi polimernymi kompozitsionnymi materialami. *Nauchnyy zhurnal stroitelstva i arkhitektury*, 3(55), 72-83. (in Russian)
- Yashchuk, M. O. (2017a). *Osobennosti raboty ustroystv dlya usileniya konstruktsiy zhelezobetonnykh mostov s primeneniem polimernykh kompozitsionnykh materialov*. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo-2016». Rostov-na-Donu, 3. 142-145. (in Russian)
- Yashchuk, M. O. (2017b). Programma laboratornykh issledovaniy zhelezobetonnykh balok, usilennykh prednapryazhennymi polimernymi kompozitsionnymi materialami. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*, 3, 158-170. (in Russian)

Надійшла до редколегії 09.09.2020.

Прийнята до друку 16.10.2020.

◆ ◆ ◆ ◆ ◆
Наукове видання
МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА
Збірник наукових праць
Дніпровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Випуск 18
(українською, англійською та російською мовами)

Відповідальні за випуск – О. Л. Тютюкін, Н. К. Бондаренко
Комп'ютерне верстання – В. Л. Рикіна
Статті в збірнику публікуються в авторській редакції

Формат 60×84 ¹/₈. Ум. др. арк. 9,78. Тираж 50 пр. Зам. № 15-дбж.

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 18
(in Ukrainian, English and Russian languages)

Responsible for issue – Oleksii Tiutkin, Nataliia Bondarenko
Desktop publishing – Vera Rykina
Articles in the collection are printed in the author's wording

Format 60×84 ¹/₈. Conventional printed sheet 9,78. Circulation 50. Order no. 15-dbg.

Publishing house «Kros-Prynt», 49047, Dnipro, Verstatobudiveljnyj Lane, 3/4
Certificate ДК no. 2804 of 26.03.2007.
Printed: SP Udovychenko O. M., 49080, Dnipro, Donecjkje 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
Днепропетровского национального университета
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна
Выпуск 18
(на украинском, английском и русском языках)

Ответственные за выпуск – А. Л. Тютюкин, Н. К. Бондаренко
Компьютерная верстка – В. Л. Рыкина
Статьи в сборнике публикуются в авторской редакции

Формат 60×84 ¹/₈. Усл. печ. лист 9,78. Тираж 50 экз. Заказ № 15-дбж.

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.

