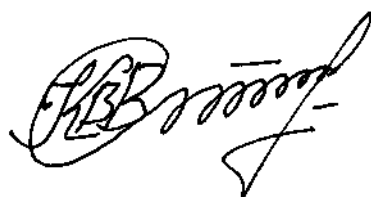


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

КОВАЛЬЧУК ВІТАЛІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 624.014:624.21:625.745.2

**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД ІЗ МЕТАЛЕВИХ
ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Міністерство освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
ЛУЧКО Йосип Йосипович,
Львівський національний аграрний університет, професор
кафедри «Будівельні конструкції».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КАРПЮК Василь Михайлович,
Одеська державна академія будівництва та архітектури,
професор кафедри залізобетонних конструкцій та
транспортних споруд, м. Одеса;

доктор технічних наук, професор
ЛАПЕНКО Олександр Іванович,
Національний авіаційний університет, завідувач кафедри
комп'ютерних технологій будівництва, м. Київ;

доктор технічних наук, с. н. с.
МАР'ЄНКОВ Микола Григорович,
Державне підприємство «Державний науково-дослідний
інститут будівельних конструкцій», завідувач відділу
автоматизації досліджень та сейсмостійкості будівель та
споруд, м. Київ.

Захист відбудеться «24» березня 2020 р., о 11⁰⁰ годині, на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 41.085.01 при Одеській державній академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеської державної академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4 та на сайті <http://odaba.edu.ua>.

Автореферат розісланий «20» лютого 2020 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д. 41.085.01, д. т. н., доцент



С. О. Кровяков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Реформування галузі залізничного транспорту, збільшення протяжності залізниць і автомобільних доріг, значна кількість дефектних транспортних споруд вимагають застосування сучасних споруд. До них, зокрема, відносяться споруди з металевих гофрованих конструкцій (далі – МГК), які використовуються у транспортному будівництві в якості малих мостів та водопропускних труб. Споруди із МГК є перспективними видами транспортних споруд, будівництво яких потребує мінімальних витрат часу, незначних витрат матеріалів, а, відповідно, і відносно невеликих фінансових ресурсів. Проте, накопичений досвід будівництва та експлуатації транспортних споруд із МГК вказує на їх недостатню несучу здатність. В умовах експлуатації споруди із МГК схильні до утворення залишкових деформацій вертикального діаметру конструкції, зміни форми поперечного перерізу, утворення пластичного шарніру. Ці процеси суттєво впливають на подальшу безпечну експлуатацію цих споруд в цілому, що зумовлює необхідність розробки теоретичних і експериментальних методів визначення та підвищення несучої здатності транспортних споруд із МГК.

Причинами зниження несучої здатності споруд із МГК можуть бути: низька якість виконання ґрунтової засипки при будівництві споруд; відсутність аналітичних методів достовірного визначення несучої здатності споруд із МГК великого поперечного перерізу (більше 6 м) у ґрунтовому середовищі при навантаженні від транспортних засобів та дії змінних кліматичних температурних впливів навколишнього середовища, які використовуються при проектуванні конструкцій; відсутність експериментальних методів моніторингу змін технічного стану споруд із МГК у початковий період експлуатації при підвищенні динамічної дії транспортних засобів через розвиток нерівностей на рейковій колії чи автомобільній дорозі.

Очевидно, що дослідження, спрямовані на вирішення проблеми розробки методів визначення та підвищення несучої здатності транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах експлуатації, є актуальними і відповідають інтересам суспільства та Національній транспортній стратегії України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, а саме – держбюджетної теми "Розробка ресурсозберігаючих технологій для захисту елементів інфраструктури від природних та техногенних впливів", яка виконувалася за держбюджетною тематикою Міністерства інфраструктури України та Міністерства освіти і науки України у 2012–2013 рр. (номер державної реєстрації 0112U003557). Тема дисертації відповідає актуальним напрямкам науково-технічної політики України щодо управління експлуатаційною надійністю і довговічністю споруд та конструкцій, зокрема Постанові Кабінету Міністрів України від 5 травня 1997 р., № 409 «Про забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж», а також напрямкам і завданням державної науково-технічної програми «Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року» (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 р., № 430-р).

Дисертаційні дослідження проведені в рамках наступних науково-технічних тем: оцінка несучої здатності металевої гофрованої конструкції, що експлуатується на

310-му кілометрі шостого пікету дільниці Вадул-Сирет–Держкордон Львівської залізниці» (тема № 500.12 ЛФ, 2013–2014 рр.); визначення технічних параметрів об'єкту «Другий залізничний в'їзд по станції Берегова Одеської залізниці» (тема № 809.18/ЛФ/021356); виконання міжнародного проекту «Криза та ризик інжиніринг в сфері транспортних послуг» (CRENG) № 598218-EPP-1-2018-1-PL-EPPKA2-SBHE-JP за програмою Erasmus+SBHE-2018 та виконанням науково-технічного супроводу будівництва тунелю із збірної оцинкованої конструкції у м. Кропивницькому з розрахунком, обстеженням і випробуванням по об'єкту: «Реконструкція проїжджої частини вул. Ельворті, вул. Миколи Левитського (Колгоспної), м. Кропивницький (1 черга об'єкту будівництва)» (договір № 1838 НВП «Тріада»).

Рівень участі автора – виконавець, відповідальний виконавець.

Метою роботи є розробка методів оцінювання та підвищення несучої здатності транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій, які зазнають дії статичних та динамічних навантажень від транспортних засобів і температурних кліматичних впливів навколишнього середовища. Для досягнення зазначеної мети необхідно розв'язати наступні **завдання**:

- розробити аналітичну модель оцінки несучої здатності транспортних споруд із МГК із врахуванням комплексу факторів – ступеня ущільнення ґрунтової засипки, величин статичного та динамічного навантажень від транспортних засобів та при різних геометричних та фізико-механічних параметрах МГК;
- провести дослідження впливу ступеня ущільнення ґрунтової засипки на несучу здатність транспортних споруд із МГК;
- розробити алгоритм визначення несучої здатності транспортних споруд із МГК на основі методу скінченних елементів;
- удосконалити пристрій та уточнити алгоритм експериментальних досліджень споруд із МГК на дію статичних та динамічних навантажень;
- розробити пристрій та програмне забезпечення для автоматизованої оцінки ступеню ущільнення ґрунтової засипки на основі імпульсного відклику і встановити характерні ознаки ступеня ущільнення у залежності від швидкості поширення пружної хвилі через ґрунтову засипку транспортних споруд із МГК;
- провести експериментальні дослідження розподілу температури на поверхнях МГК транспортних споруд у різні пори року та години доби;
- удосконалити аналітичну модель визначення температурного поля та термопружного стану транспортних споруд із МГК при дії змінних кліматичних температурних перепадів навколишнього середовища;
- провести оцінку термопружного стану відремонтованої залізобетонної транспортної споруди шляхом застосування металевих гофрованих конструкцій;
- розробити моделі оцінки несучої здатності транспортних споруд із МГК підсиленних ребрами жорсткості;
- виконати розробку інерційної системи моніторингу технічного стану транспортних споруд із МГК в умовах експлуатації.

Об'єкт досліджень – транспортні споруди із металевих гофрованих конструкцій.

Предмет досліджень – методи оцінювання та підвищення несучої здатності транспортних споруд із МГК, при дії статичних та динамічних навантажень від

транспортних засобів і температурних кліматичних впливів навколишнього середовища.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у дисертаційній роботі використано: метод скінченних різниць, метод скінченних елементів, методи чисельного розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь.

Теоретичні розрахунки, експериментальні вимірювання і статистичну обробку даних виконано з використанням прикладного програмного забезпечення Matlab 2018, у тому числі й спеціального призначення, розробленого як з участю автора, так і реалізація математичних моделей на основі теорії пружності.

При обробці результатів експериментальних досліджень щільності ґрунтової засипки транспортних споруд із МГК використано методи цифрової обробки сигналів.

Під час експериментальних вимірювань напружено-деформованого стану МГК використано аналогово-цифровий перетворювач E14-140 MD, тензорезистори марки ПКБ. Обробку експериментальних даних вимірювань аналогових сигналів виконано із використанням програмного комплексу LGraph 2.

Для розробки інерційної системи моніторингу технічного стану транспортних споруд із МГК використано сучасні високочастотні мікроконтролери типу ESP-32, трьохосьові акселерометри ADXL 335.

Обґрунтованість та достовірність отриманих у дисертації результатів, підтверджується серіями тестових задач, рішення яких отримані за допомогою відомих аналітичних методів будівельної механіки, теорії пружності, а також у відомих програмних комплексах, які реалізують метод скінченних елементів. Результати розрахунків напружень та деформацій МГК, які одержані у дисертаційній роботі, збігаються з даними натурних експериментів і знаходяться у межах допустимих похибок.

Отримані в дисертації основні наукові положення, висновки й рекомендації обґрунтовані та достовірні, оскільки експериментальні дослідження достовірно поставлені та кваліфіковано виконані за участю науково-дослідної лабораторії кафедри верхньої та нижньої будов залізничної колії Дрезденського технічного університету (Німеччина).

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- удосконалено аналітичну модель оцінки несучої здатності транспортних споруд із МГК, яка на відміну від існуючих методів, враховує комплекс факторів – ступень ущільнення ґрунтової засипки, величини статичного та динамічного навантажень транспортних засобів, геометричні і фізико-механічні параметри металевої гофрованої конструкції;

- вперше проведено визначення несучої здатності споруд із МГК у залежності від ступеня ущільнення ґрунтової засипки;

- отримав подальший розвиток метод визначення несучої здатності транспортних споруд із МГК великого перерізу із використанням сучасних програмних комплексів скінченно-елементного моделювання;

- удосконалено пристрій та уточнено алгоритм із визначення напружено-деформованого стану МГК, що дозволяє проводити експериментальні дослідження несучої здатності споруд із МГК при дії статичних та динамічних навантажень;

– вперше розроблено пристрій та програмне забезпечення для автоматизованого оцінювання ступеня ущільнення ґрунтової засипки на основі імпульсного відклику та вперше встановлено характерні ознаки ступеня ущільнення ґрунтової засипки транспортних споруд із МГК у залежності від швидкості поширення пружної хвилі через ґрунтове середовище на основі інерційних вимірювань;

– вперше накопичено та узагальнено експериментальні дані розподілу температури на поверхнях металевих гофрованих конструкцій споруд у різні пори року та години доби при дії змінних кліматичних температурних перепадів навколишнього середовища;

– удосконалено аналітичну модель визначення температурного поля та термопружного стану транспортних споруд із МГК за дії змінних кліматичних температурних перепадів навколишнього середовища, що дозволяє проводити оцінку термопружного стану конструкції із врахуванням нерівномірного розподілу температури на поверхнях металевих гофрованих листів конструкції;

– вперше проведено оцінку термопружного стану тришарової споруди, відремонтованої методом застосування металевих гофрованих конструкцій;

– вперше розроблені моделі визначення несучої здатності споруд із МГК підсилені ребрами жорсткості із врахуванням впливу експлуатаційних умов;

– вперше розроблено інерційну систему моніторингу технічного стану споруд із МГК для проведення натурних випробувань цих споруд.

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблені аналітичні методи оцінки несучої здатності транспортних споруд із МГК дозволяють проводити оцінку їх несучої здатності, а конструктивні варіанти та система моніторингу технічного стану – забезпечувати несучу здатність цих споруд;

– удосконалені аналітичні методи визначення несучої здатності транспортних споруд із МГК рекомендується використовувати інженерам мостовипробувних станцій Укрзалізниці, проектно-кошторисних відділів, державному агентству автомобільних доріг України (Укравтодор) і організаціям, які займаються проектуванням, будівництвом та утриманням транспортних споруд із МГК;

– методи та моделі, розроблені у рамках дисертаційної роботи, були використані при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі рухомого складу і колії Львівської філії ДНУЗТ та кафедрі мостів і тунелів ДНУЗТ;

– розроблені методи із підвищення несучої здатності дефектних залізобетонних споруд із використанням МГК можуть бути використані при реконструкції (капітальному ремонті) пошкоджених залізобетонних труб та малих мостів;

– розроблені інерційна система оцінювання ступеня ущільнення ґрунтової засипки та система моніторингу технічного стану споруд із МГК впроваджені у лабораторію верхньої та нижньої будов залізничної колії Дрезденського технічного університету (Німеччина) та при виконанні міжнародного грантового проекту «Криза та ризик інжиніринг в сфері транспортних послуг» (CRENG) № 598218-EPP-1-2018-1-PL-EPPKA2-SBHE-JP за програмою Erasmus+SBHE-2018;

– нові підходи, положення й результати досліджень використані під час виконання науково-дослідної роботи «Розробка ресурсозберігаючих технологій для захисту елементів інфраструктури від природних та техногенних впливів», яка виконувалася за держбюджетною тематикою Міністерства інфраструктури України

та Міністерства освіти і науки України (номер державної реєстрації 0112U003557) та при виконанні залізнично-транспортної експертизи з господарської справи за договором 500.12 ЛФ. (2013–2014 рр.) із проведення експертної оцінки несучої здатності труби із МГК діаметром більше 6 м на ділянці Вадул-Сирет–Держжордон Львівської залізниці;

– інерційну систему моніторингу несучої здатності споруд рекомендується застосувати при натурних випробуваннях транспортних споруд із МГК, які експлуатуються під залізничною колією та автомобільною дорогою. Запропонована система використана при натурних випробуваннях шляхопроводу із МГК на ділянці залізничної колії Котовськ–Знам'янка і автомобільної дороги по вул. Миколи Левитського (Колгоспній) у м. Кропивницькому;

– більшість теоретичних положень, викладених у дисертаційній роботі, впроваджено у навчальний процес Львівської філії ДНУЗТ під час викладання дисциплін «Будова та експлуатація штучних споруд залізниць» та «Механіка ґрунтів, основи та фундаменти».

Особистий внесок здобувача. Формулювання мети і задач дисертації, планування експериментів та обговорення результатів виконано разом із науковим консультантом.

Автор дисертаційної роботи сформулював наукову гіпотезу досліджень, розробив комплексну методику оцінки несучої здатності споруд із МГК із врахуванням дії таких багатоваріантних факторів, як: ступінь ущільнення ґрунтової засипки, величина статичного та динамічного навантажень від транспортних засобів і різних геометричних та фізико-механічних параметрів МГК; виконав інтерпретацію отриманих експериментальних даних несучої здатності споруд із МГК; розробив інерційні методи визначення ступеня ущільнення ґрунтової засипки споруд із МГК; провів експериментальні вимірювання розподілу температури на поверхнях металевих гофрованих листів конструкції та удосконалив аналітичну методику оцінки їх термопружного стану; розробив засоби відновлення та методи оцінки несучої здатності пошкоджених транспортних споруд із МГК, підсилених ребрами жорсткості; розробив та реалізував інерційну систему моніторингу технічного стану споруд із МГК.

Усі основні результати дисертаційної роботи одержані самостійно. Особистий внесок автора в роботах, які надруковані в співавторстві, полягає в наступному: у [1, 22] – розробив методику розрахунку температурного поля та термопружного стану конструкцій при дії змінних кліматичних температурних перепадів навколишнього середовища та провів експериментальні вимірювання розподілу температури на поверхнях МГК у різні пори року; у [2] – розробив аналітичну методику оцінки несучої здатності мостів і труб із МГК і провів експериментальні дослідження напружено-деформованого стану труби із МГК в умовах експлуатації; у [4, 16] – розрахував напружено-деформований стан споруд із МГК у залежності від ступеня ущільнення ґрунтової засипки та величини динамічного навантаження від рухомого складу залізничного транспорту; у [6, 23, 27, 28, 48] – розробив математичну модель та провів дослідження розладнання геометрії залізничної колії внаслідок нерівномірних осідань ґрунтової ущільнюючої засипки транспортних споруд із МГК та баластного шару колії; у [12] – розробив методику та провів дослідження несучої здатності труби із МГК за

критерієм розвитку пластичного шарніру у її склепінні; у [13, 33, 34] – запропонував спосіб та пристрій визначення напружень у мостах та транспортних спорудах із МГК, які виникають внаслідок дії змінних температур та навантажень; у [14] – проаналізував методи оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій; у [15, 25, 26, 40] – розробив методику оцінки несучої здатності транспортних споруд із МГК в умовах експлуатації; у [17] – провів дослідження несучої здатності споруд із МГК; у [18] – розробив алгоритм скінченно-елементного розрахунку споруд та розробив рекомендації із відновлення дефектних залізобетонних споруд із використанням МГК; у [19] – провів оцінку несучої здатності металевої гофрованої конструкції типу Multiplate MP150 із врахуванням ступеню ущільнення ґрунтової засипки; у [20] – дослідив вплив діаметру МГК на напружено-деформований стан споруди в цілому; у [21, 47] – провів дослідження змін кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення ґрунтового насипу при дії вібраційного транспортного навантаження; у [24] – удосконалив математичну модель оцінки температурного поля та термопружного стану споруд із МГК при дії змінних кліматичних температурних перепадів навколишнього середовища; у [29, 30, 31] – розробив пристрої для оцінки ступеню ущільнення ґрунтової засипки та провів лабораторні дослідження швидкостей поширення пружних хвиль ударів у залежності від ступеню ущільнення ґрунтового середовища; у [37] – розробив рекомендації із застосування металевих гофрованих конструкцій при ремонті дефектних залізобетонних труб на залізничних та автомобільних дорогах України; у [38, 42] – провів дослідження впливу ґрунтів та розміру типу гофр на напружено-деформований стан МГК типу горизонтальний еліпс; у [39] – запропонував модель оцінки несучої здатності транспортних споруд із МГК, які експлуатуються під залізничною колією; у [41] – розробив засоби неруйнівного контролю напружено-деформованого стану МГК транспортних споруд та у [44, 45, 46] – отримав результати оцінки несучої здатності споруд із МГК при дії експлуатаційних навантажень.

Апробація дисертаційної роботи. Основні положення і результати досліджень представлено на міжнародних, всеукраїнських і регіональних конференціях та семінарах: Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», присвяченій 100-річчю професора Мойсея Абрамовича Фрішмана (Дніпропетровськ, вересень 2013 р.); X Міжнародній науково-практичній конференції «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій» (Івано-Франківськ – Криворівня, липень 2014 р.); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», присвяченій 50-річчю з дня заснування навчально-наукового інституту будівництва та архітектури (м. Рівне, жовтень 2014 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Мости і тунелі: теорія, дослідження, практика» (м. Дніпропетровськ, 14–15. 10. 2014 р.); II International scientific conference «Durability and construction repairs efficiency» (Poznan, 19–21. 11. 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті», присвяченій 80-річчю кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин (м. Харків, 26–28. 11. 2014 р.); Міжнародному технічному семінарі «Перспективні технології ремонту земляного полотна та верхньої будови колії» (м. Львів, березень 2015 р.); 75-й та 79-й Міжнародній науково-практичній

конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», присвяченій 85-річчю заснування Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДПТ) (м. Дніпро, 14–15 травня 2015 р., 16–17. 05. 2019 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми наукового та освітнього простору в умовах поглиблення євроінтеграційних процесів» (м. Мукачеве, 14–15 травня 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції імені доктора технічних наук Сокола Едуарда Миколайовича «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд» (м. Львів, 9–11 вересня 2015 р.); Міжнародній науковій конференції «Методи викладання та методи дослідження в математиці» (м. Берегово, 21–23 квітня 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми реконструкції, розширення і підсилення автодорожніх мостів, будівель і споруд», присвяченій, зокрема, 80-річчю професора Віктора Кваші (м. Львів, 2017 р.); V Міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (м. Тернопіль, 2017 р.); Proceedings of the 1st Annual Conference. Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions. Physical Sciences and Engineering (Ukrainian Section) (23 November 2017. – Tallinn, Estonia); 6th International Scientific Conference organized by Railway Research Institute and Faculty of Transport of Warsaw University of Technology. Advanced rail technologies. (Warsaw, 2017).; V Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2018 р.); 1-й та 2-й Міжнародній науково-практичній конференції «Енергооптимальні технології, логістика та безпека на транспорті» (м. Львів, 18–19 червня 2018 р., 19–20 вересня 2019 р.); XXIII International Seminar/Workshop on direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory (DIPED) (Tbilisi, Georgia, September 2018); Науково-практичному семінарі «Актуальні проблеми ремонтів та утримання мостів» (м. Одеса, 11–12. 09. 2019 р.) та на III Міжнародній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель та споруд» (м. Одеса, 26–28. 09. 2019 р.).

У повному обсязі дисертація доповідалася на: засіданні міжкафедрального спеціалізованого наукового семінару «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» Одеської державної академії будівництва та архітектури 17 грудня 2019 року; розширеному засіданні кафедри «Мости та тунелі» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна 25 жовтня 2019 р.; III міжнародній науково-практичній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» в Одеській державній академії будівництва та архітектури 26–28 вересня 2019 року; розширеному засіданні наукового польсько-українського семінару кафедр «Мости і дороги» та «Будівельні конструкції» Люблінської політехніки (Польща) 02 липня 2019 р.; розширеному міжкафедральному науковому семінарі кафедр «Будівельні конструкції», «Технологія та організація будівництва», «Вища математика» Львівського національного аграрного університету 11 червня 2019 р.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 48 наукових працях, з котрих 22 у фахових спеціалізованих виданнях України, 6 з яких у виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus, 7 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, 4 з яких індексуються у наукометричній базі

Scopus, 2 монографії, 3 патенти України на корисну модель та 12 тез доповідей у збірниках наукових конференцій, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації, а також 2 наукові статті, що додатково відображають результати роботи (одна з яких індексується у наукометричній базі Scopus, а друга – у Web of Science).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та шести додатків.

Основний текст роботи викладено на 300 сторінках. Дисертація містить усього 196 рисунків та 33 таблиці. Список літератури із 360 найменувань викладено на 37 сторінках та 6 додатків на 85 сторінках. Повний обсяг дисертації 445 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та проблему теми роботи, сформульовано мету й задачі досліджень, відображено наукову новизну результатів та їх практичне значення, відображено особистий внесок здобувача, а також результати апробації та дані про публікації роботи.

У **першому розділі** наведено аналіз досвіду, перспектив та проблем експлуатації транспортних споруд із МГК та проведено аналіз методів оцінки їх несучої здатності.

Значний вклад у розвиток теоретичних та експериментальних досліджень несучої здатності споруд із МГК вклали наступні науковці: Банах В. А., Виноградов С. В., Герцог А. А., Колоколов Н. М., Карпюк В. М., Кожушко В. П., Коваль П. М., Кулябко В. В., Кваша В. Г., Лучко Й. Й., Лантух-Лященко А. І., Мішутін А. В., Никифоров А. С., Пічугін С. Ф., Слободянюк С. О., Тютюкін О. Л., Щербина К. Б., Фрезе М. В., Янковский О. А., Spangler M. G., Beben D., Karas S., Mańko Z., Овчинников И. И., Гнедовский В. Н., Machelski Cz., Wysokowski A., Janusz L., Duncan J. M., Drawsky R. H., Vaslestad J., Pettersson L., Leander J., Hansing L., Kunecki B., Howis J. та ін.

Із проведеного аналізу науково-дослідних робіт встановлено, що значний вплив на несучу здатність споруд із МГК має ступінь ущільнення ґрунтової засипки при їх спорудженні, що підкреслює необхідність розробки методів контролю ступеня ущільнення ґрунтової засипки таких споруд. Крім ступеня ущільнення ґрунтової засипки, вагомий внесок у появу пошкоджень та зниження несучої здатності може дати відсутність методів достовірного визначення несучої здатності споруд із МГК діаметром більше 6 м при дії статичних та динамічних навантажень від транспортних засобів та змінних температурних кліматичних впливів навколишнього середовища. Слід зазначити, що методи визначення несучої здатності споруд із МГК при експлуатації у тілі насипу залізничної колії взагалі відсутні.

Методи визначення несучої здатності МГК за критерієм відносних деформацій не придатні. Оскільки значним недоліком критерію відносних деформацій є те, що на них впливає конструктивний діаметр споруди, тобто критерій є один для всіх можливих поперечних перерізів МГК, таким чином абсолютне значення деформацій конструкцій може бути в кожному випадку різним. Тому разом із відносною деформацією повинні враховуватися також і абсолютні деформації МГК.

Отже, проблема розробки методів визначення та підвищення несучої здатності споруд із МГК із врахуванням взаємозв'язку ступеню ущільнення ґрунтової

засипки, статичної та динамічної дії транспортних засобів та температурних кліматичних впливів навколишнього середовища є актуальною.

Із врахуванням зазначеної проблеми сформульовано *робочу гіпотезу дисертації*, яка полягає в наступному. Визначення та підвищення несучої здатності споруд із МГК в умовах експлуатації здійснюється шляхом розробки теоретичних та експериментальних методів. Теоретична сторона проблеми вирішується удосконаленням аналітичних методів достовірного визначення несучої здатності споруд із МГК великого поперечного перетину у ґрунтовому середовищі при експлуатаційному навантаженні від транспортних засобів та дії змінних кліматичних температурних впливів навколишнього середовища, які використовуються при проектуванні конструкцій. Експериментальна сторона вирішується шляхом розробки інерційних пристроїв для контролю ступеню ущільнення ґрунтової засипки у лабораторних умовах і при будівництві споруд із МГК та розробкою інерційної системи моніторингу змін технічного стану споруд у початковий період експлуатації при підвищенні динамічної дії транспортних засобів через нерівномірні осідання ґрунтової ущільнюючої засипки.

У *другому розділі* подано комплексну аналітичну методику оцінювання несучої здатності транспортних споруд із МГК, що враховує процеси нерівномірних осідань ґрунтової засипки над металевими гофрованими конструкціями при коротко- та довгострокових динамічних і статичних навантаженнях від транспортних засобів, ступінь ущільнення ґрунтової засипки та фізико-механічні й геометричні параметри металевих гофрованих конструкцій.

На транспортні споруди із МГК діють постійні навантаження від власної ваги ґрунтової засипки; навантаження від щебеневого баластного шару залізничної колії; навантаження від рейко-шпальної решітки або дорожнього полотна автомобільної дороги та тимчасові навантаження від транспортних засобів. Розглянуті навантаження викликають вертикальний і горизонтальний тиски на металеву гофровану конструкцію та впливають на несучу здатність споруди в цілому. Розрахункова схема споруди із МГК наведена на *рис. 1*.

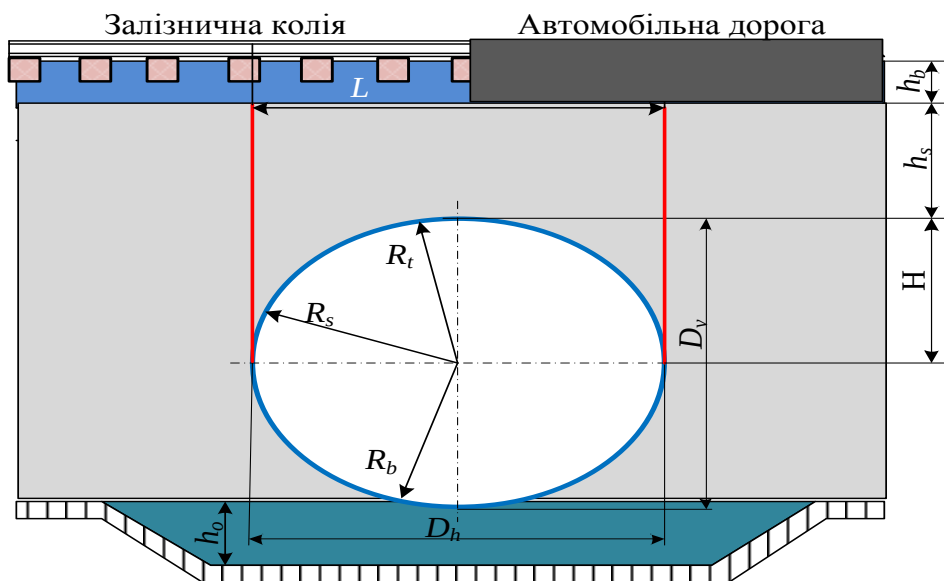


Рис. 1. Розрахункова
схема споруди
із МГК

Сумарне навантаження на металеву гофровану конструкцію становить:

$$q = q_{st} + p_{tr}, \quad (1)$$

де: q_{st} – статичне навантаження, яке враховує навантаження від ґрунтової засипки, щебеневого баласту та рейко-шпальної решітки або конструкції автомобільної дороги; p_{tr} – тимчасове навантаження від дії транспортних засобів.

Модуль деформації ґрунтової засипки визначається за формулою:

$$E_{s.d} = \frac{1}{\gamma_n \gamma_m} 0.42 \cdot m \cdot k_v \left((1 - \sin \varphi_k) \cdot \rho \cdot S_{ar} (h_c + H / 2) \right)^{1-\beta}, \quad (2)$$

де: γ_n, γ_m – коефіцієнти, які залежать від класу безпеки споруди; h_c – висота ґрунтової засипки.

Кут внутрішнього тертя ґрунтової засипки розраховується за формулою:

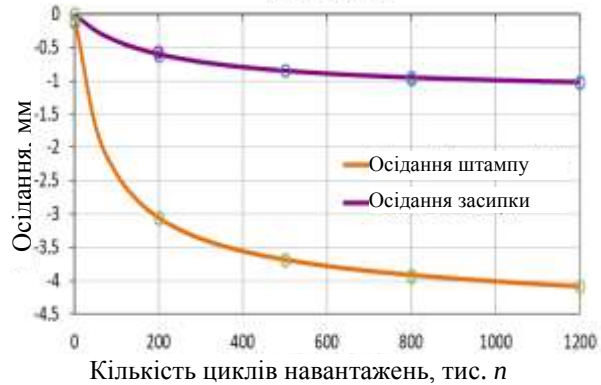
$$\varphi_k = 26^\circ + 10 \cdot (RP - 75) / 25 + 0,4 \cdot C_u + 1,6 \cdot \log_{10} (d_{50}), \quad (3)$$

де: d_{50} – розмір частинок матеріалу, частка яких становить 50 %; RP – ступінь ущільнення ґрунтової засипки.

Однією із причин розвитку залишкових деформацій споруд із МГК є неврахування процесів осідання щебенево-піщаної засипки в умовах дії рухомих транспортних засобів. Тому було проведено дослідження осідання щебенево-піщаної засипки при дії динамічного навантаження у лабораторних умовах (рис. 2).



a



b

Рис. 2. Процес (a) та результати (b) експериментальних досліджень осідання щебенево-піщаної засипки при дії динамічного навантаження

З експериментальних результатів вимірювання осідання засипки встановлено, за період перших 200 тис. циклів навантажень, осідання засипки становить 2/3 осідань, що досягаються після пропуску 1 200 тис. циклів навантажень. А сумарне осідання щебенево-піщаної засипки складається із суми пластичної та в'язкопластичної складових:

$$S_T = S_{T1} + S_{T2}. \quad (4)$$

Пластичне осідання S_{T1} відбувається негайно, якщо опорне навантаження q_0 перевищує показник максимального опорного навантаження $(q_0)_{\max}$. При введенні пластичної константи c_{p1} та в'язко-пластичної c_{p2} отримаємо формулу для знаходження загального осідання засипки:

$$S_T = c_{p1} \cdot (q_0)_{\max} \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot (1 - e^{c_{p2} \cdot c}) \right]. \quad (5)$$

За формулою (5) можна розрахувати осідання щебенево-піщаної засипки, а відповідно і розвиток нерівності на шляху, що має вплив на підвищення динамічної дії на споруди із МГК, а відтак і зниження їх несучої здатності.

Вертикальні напруження σ_v на глибині z пружного тіла (вертикально під навантаженням), спричинені лінійним навантаженням p на півплощині, визначаються за формулою Буссінеска:

$$\sigma_v = \frac{2 \cdot p}{\pi \cdot z}. \quad (6)$$

Далі визначаються еквівалентні лінійні навантаження на металеві гофровані конструкції транспортних споруд за формулою:

$$p_{tr} = \frac{\pi(h_s + h_b)}{2} \sigma_v. \quad (7)$$

На основі значень осевих сил та згинальних моментів розраховуємо максимальні напруження металевих гофрованих конструкцій, із врахуванням коефіцієнту безпеки ξ :

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{\xi M}{W} < f_{yd}, \quad (8)$$

де: N , M – осеві сили та моменти сил у стані нормальної експлуатації споруди; A , W – площа та момент опору поперечного перерізу конструкції; f_{yd} – границя текучості металу конструкції.

Перевірку величини коефіцієнту пластичного шарніру у металевій гофрованій конструкції проводимо за формулою:

$$\left(\frac{N_{d,u}}{\omega f_{yd} A} \right) + \left(\frac{M_{d,u}}{M_u} \right) \leq 1,0, \quad (9)$$

де: $N_{d,u}$, $M_{d,u}$ – повздовжні сили та моменти сил у гранично можливому стані експлуатації конструкції; M_u – допустиме значення згинального моменту, при якому досягається напруження текучості; ω – коефіцієнт, значення якого залежить від критичного навантаження на металеву гофровану конструкцію.

Результати багатоваріантних розрахунків перевірки труби із МГК за допустимими напруженнями та на утворення пластичного шарніру при різних значеннях величин ступеня ущільнення ґрунтової засипки і модулів пружності підрейкової основи та технічного стану колії наведені у *табл. 1*. Труба виконана із конструкцій типу Multiplate MP150 із параметрами гофри 150x50x6 мм. Форма труби із МГК – горизонтальний еліпс із шириною 6,57 м та висотою 6,2 м.

Таблиця 1

Результати розрахунку напружень та коефіцієнту пластичного шарніру у трубі із МГК

Стан колії	Модуль пружності підрейкової основи 73,6 МПа				Модуль пружності підрейкової основи 92,1 МПа			
	Ступінь ущільнення ґрунтової засипки, %							
	85	90	95	97	85	90	95	97
Без нерівності	54,555	43,906	29,68	24,19	55,21	44,428	30,073	24,53
	0,226	0,159	0,108	0,135	0,229	0,161	0,134	0,107
Нерівність з параметрами: $l=3$ м; $h=10$ мм; $i_{\text{нер}}=3,3$ ‰	143,883	125,276	123,46	120,05	158,894	135,273	131,49	127,71
	0,612	0,542	0,515	0,509	0,656	0,547	0,559	0,533
Нерівність з параметрами: $l=5,7$ м; $h=44,7$ мм; $i_{\text{нер}}=16,5$ ‰	270,516	216,169	160,299	138,742	295,146	235,815	175,196	151,807
	1,233	0,949	0,676	0,573	1,353	1,045	0,749	0,637

Примітки до *табл. 1*: у чисельнику наведені значення напружень, а в знаменнику – значення коефіцієнту пластичного шарніру.

Розрахунками встановлено, що безпосередньою причиною виникнення залишкових деформацій труби із МГК може стати зростання напружень у металевих гофрованих листах труби до значень, близьких до границі допустимих, та, як наслідок, місцеве зародження пластичних деформацій, у результаті розвитку експлуатаційної нерівності на шляху та ступеня ущільнення ґрунтової засипки нижче 90 %. Переважаюче значення має причина розвитку експлуатаційної нерівності, частка впливу якої становить 75 %, а частка ступеня ущільнення ґрунтової засипки нижче 90 % становить 25 %. При відсутності однієї з причин зародження пластичного шарніру у трубі із МГК не може відбутися.

Для визначення несучої здатності шляхопроводу із МГК на км 228+160 автомобільної дороги Київ–Харків–Довжанський здійснено завантаження шляхопроводу автосамоскидами вагою по 38 т за чотирма схемами (рис. 3). Схема 1 – один автосамоскид (А1) розташований над віссю шляхопроводу; схема 2 – два автосамоскиди (А1, А2) на одній смузі руху автомобільної дороги; схема 3 – два автосамоскиди (А1, А2) на одній смузі руху і один автосамоскид (А3) на другій смузі руху та схема 4 – чотири автосамоскиди над віссю шляхопроводу по два (А1 і А2, А3 і А4) на різних смугах руху автомобільної дороги.

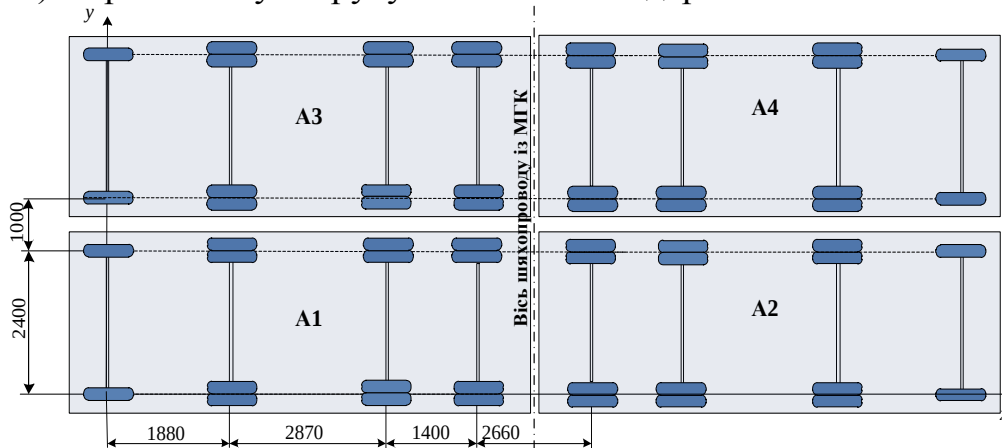


Рис. 3. Схеми завантаження шляхопроводу із МГК автосамоскидами

Поперечний переріз споруди – горизонтальний еліпс, шириною – 13,026 м; висотою – 8,831 м та довжиною – 41,99 м. Матеріал конструкції – гофрований оцинкований метал із геометричними параметрами гофри – 380×140×7 мм.

Результати розрахунку вертикальних тисків на МГК шляхопроводу наведено на рис. 4. При висоті ґрунтової засипки $h_c=2,0$ м максимальна величина вертикального тиску на МГК за схемою завантаження №1 становить – 33,51 кПа; схемою №2 – 38,92 кПа; схемою №3 – 58,41 кПа та за схемою №4 – 62,31 кПа.

Максимальні напруження у металевих гофрованих конструкціях виникають при завантаженні шляхопроводу чотирма автосамоскидами і становлять 71,59 МПа, а величина коефіцієнту пластичного шарніру при заданому навантаженні становить 0,199 (табл. 2).

Таблиця 2

Результати напружень та величин коефіцієнту пластичного шарніру у шляхопроводі із МГК

Схеми завантаження шляхопроводу	Напруження, МПа	Коефіцієнт пластичного шарніру
Схема 1	61,51	0,155
Схема 2	63,41	0,163
Схема 3	70,23	0,193
Схема 4	71,59	0,199

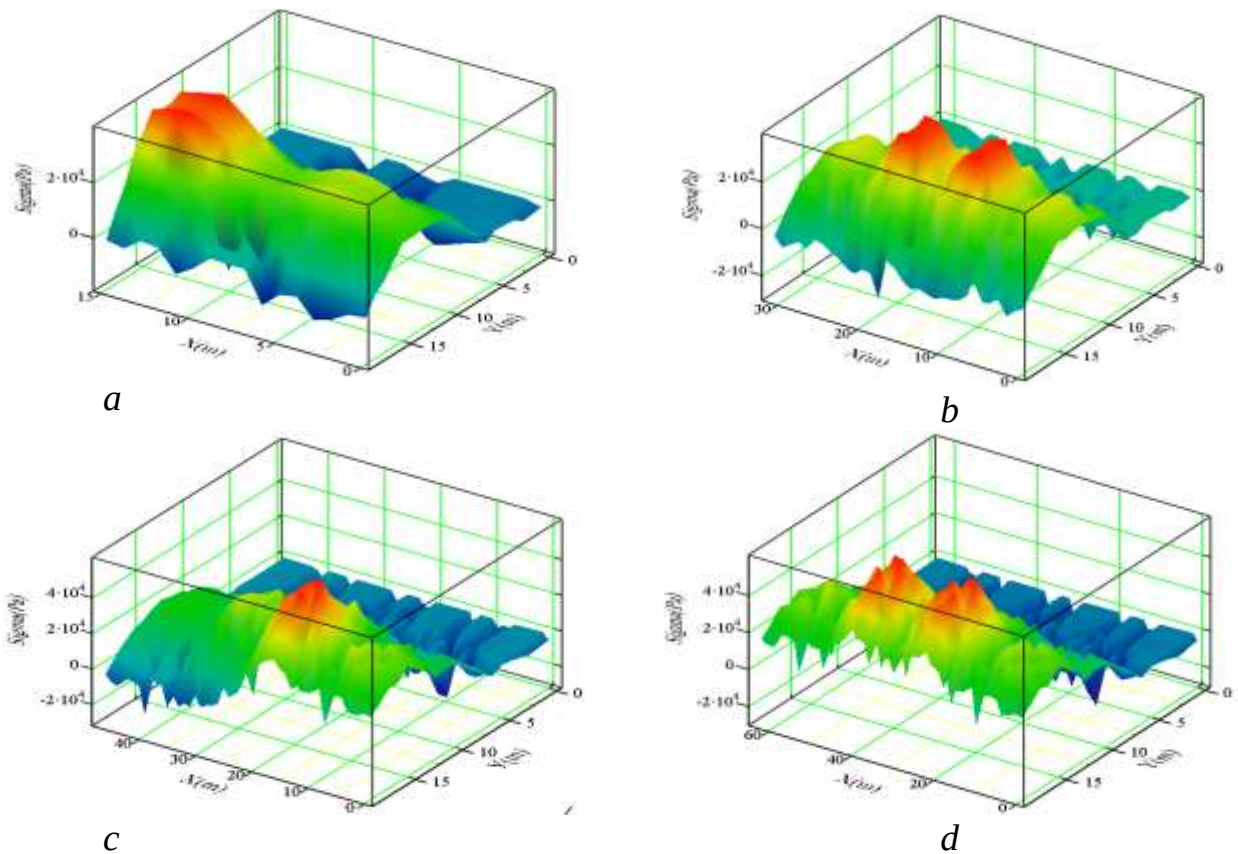


Рис. 4. Вертикальний тиск на МГК при схемах завантаження автосамоскидами:
 а – схема 1; б – схема 2; с – схема 3 та d – схема 4

Різниця напружень у МГК отриманих при завантаженні шляхопроводу одним автосамоскидом та чотирма становить до 15 %, що пояснюється ефективним розподілом навантажень від транспортних засобів у ґрунтовій засипці. Досягнуті максимальні напруження становлять 20 % від допустимих значень напружень, тому можна стверджувати, що несуча здатність шляхопроводу із МГК при нормативному ступені ущільнення ґрунтової засипки забезпечена.

Для дослідження несучої здатності шляхопроводу із МГК, який експлуатується у м. Кропивницькому, були проведенні багатоваріантні розрахунки при завантаженні шляхопроводу локомотивами ЧМЭ 3 та 2М62, вантажним вагоном із візками 4ЦНИИ-ХЗ-0 та пасажирським вагоном із візками КВЗ-ЦНИИ. Поперечний переріз шляхопроводу із гофрованих конструкцій типу SuperCor (380x140x6 мм) – еліпс із шириною – 9,23 м, висотою – 8,12 м та довжиною – 34,19 м. Матеріал засипки – щебенево-піщана суміш фракцій 0,01–40 мм із ступенем ущільнення $RP=97\%$. Висота ґрунтової засипки 2,57 м.

Результати перевірки шляхопроводу із МГК на допустимі напруження та величини коефіцієнту пластичного шарніру у залежності від експлуатаційних навантажень залізничного транспорту наведені у *табл. 3*. Максимальне значення напружень у МГК шляхопроводу виникає при проходженні ділянкою залізничної колії локомотива 2М62 і становить 145,45 МПа, що є меншим за 355 МПа. При цьому коефіцієнт величини пластичного шарніру становить 0,41, що є меншим за 1,0. Отже, метал гофрованої конструкції працює у пружній стадії та має достатній запас міцності. Тому несуча здатність шляхопроводу із збірних металевих гофрованих конструкцій типу SC 70 Special (SuperCor) забезпечена.

**Перевірка шляхопроводу із МГК на допустимі напруження
та величини коефіцієнту пластичного шарніру**

Експлуатаційні навантаження	Ступінь ущільнення ґрунтової засипки		
	RP=97 %		
Швидкість рухомого складу, км/год	40	80	100
Локомотив ЧМЭ 3	99,02/0,243	129,68/0,353	-
Локомотив 2М62	95,91/0,232	127,82/0,307	145,45/0,41
Вантажний вагон із візками 4ЦНИИ-ХЗ-0	101,94/0,254	127,69/0,307	141,45/0,395
Пасажирський вагон із візками КВЗ-ЦНИИ	90,49/0,213	91,81/0,218	107,24/0,272

У *третьому розділі* наведено методику скінченно-елементного розрахунку несучої здатності транспортних споруд із МГК великого поперечного перерізу (більше 6 м) із використанням програмного забезпечення FEMAP with MSC NASTRAN та встановлено механізм причин розвитку залишкових деформацій металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд в умовах експлуатаційних навантажень.

Для скінченно-елементного розрахунку транспортної споруди із МГК розіб'ємо споруду на чотири області, які характеризуються різними фізико-механічними та геометричними параметрами (рис. 5).

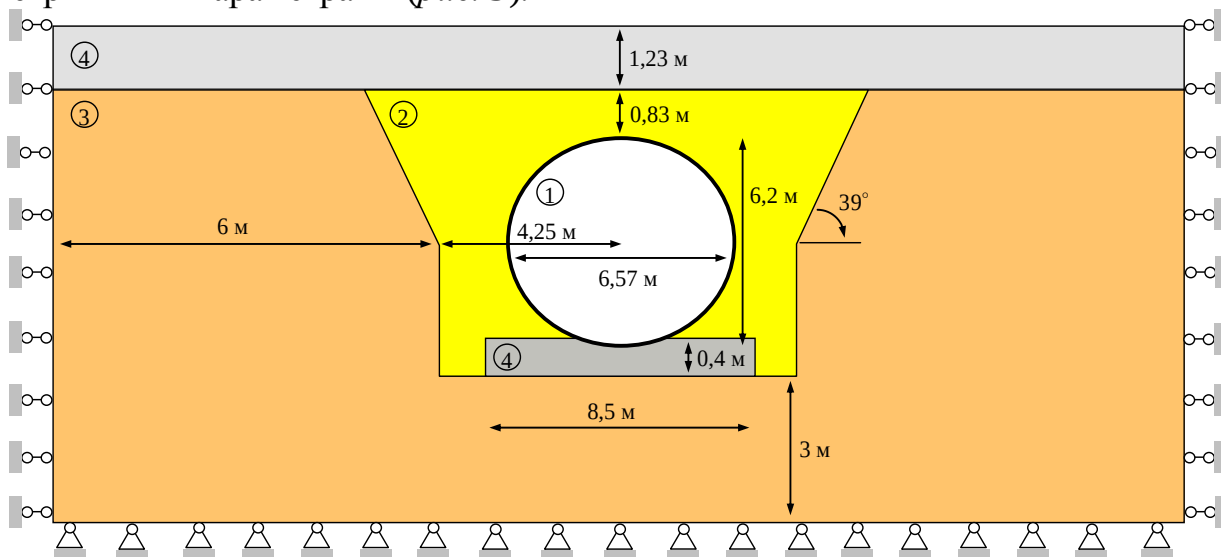


Рис. 5. Розрахункова схема транспортної споруди із МГК

Розрахунки несучої здатності споруди проводились при значеннях коефіцієнтів ступеню ущільнення ґрунтової засипки рівними: 97 %, 90 % та 85 % із перерахунком відповідних значень фізико-механічних параметрів ґрунтової засипки.

Навантаження на конструкцію задавали від власної ваги засипки, шару щебню, рейко-шпальної решітки та тимчасового навантаження від транспортних засобів, що виникають при параметрах геометричної нерівності: $l=3$ м, $h=10$ мм та $i_{\text{нер}}=3,3$ ‰.

У вузлах елементів нижньої частини ґрунтової засипки задані нерухомі шарніри, які унеможливають лінійні переміщення, а у вузлах елементів бічних граней введена заборона горизонтальних переміщень.

Взаємозв'язок між напруженнями і деформаціями для ізотропного матеріалу в матричному вигляді закону Гука має вигляд:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (10)$$

де $[D]$ – матриця пружності.

Напруження визначаємо за формулою:

$$\{\sigma\} = [\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{zx}]. \quad (11)$$

Деформації визначаємо за формулою:

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{zx}]. \quad (12)$$

Пластична поведінка ґрунтової засипки визначається за критерієм пластичності Мора-Кулона. Вважається, що пластичність починається тоді, коли напруження відповідають критерію пластичності:

$$F(\{\sigma\}, x) = 0. \quad (13)$$

Епюри розподілу еквівалентних напружень у трубі із МГК за гіпотезою Мізеса, залежно від ступеню ущільнення ґрунтової засипки, наведено на *рис. 6*.

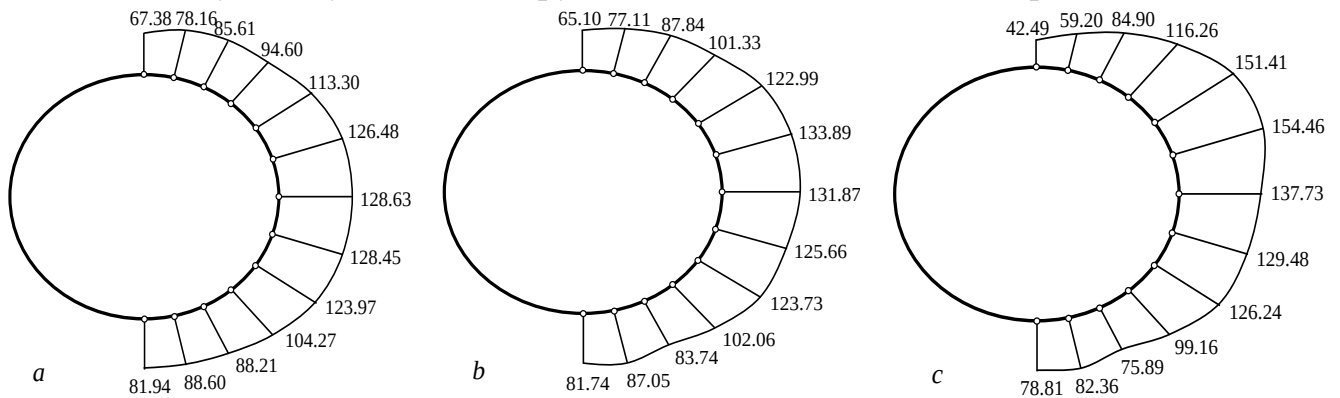


Рис. 6. Розподіл еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}}^{\text{IV}}$ [МПа] по контуру перерізу труби із МГК у залежності від ступеня ущільнення ґрунтової засипки:
a – $RP=97\%$; *b* – $RP=90\%$; *c* – $RP=85\%$

Аналіз результатів напружено-деформованого стану труби із МГК показує стійку тенденцію до збільшення абсолютних значень напружень і деформацій із зменшенням ущільнення ґрунту. Це пояснюється тим, що недостатнє ущільнення ґрунту не призводить до явища розпирання конструкції, тобто до її зміцнення. Чим більший показник ущільнення ґрунту, тим більший спротив засипки деформаціям труби і тим більшу частку навантаження на трубу перебирає на себе ґрунтова засипка. Зміна ущільнення ґрунту (як і зміна величини навантаження) призводить до перерозподілу внутрішніх зусиль (згинальних моментів і осьових сил) у перерізах гофрів конструкції і, як наслідок, до зміни положення точок, у яких спостерігаються максимальні значення напружень. Максимальні напруження при ступені ущільнення ґрунтової засипки у 97 % становлять 128,63 МПа; при 90 % – 133,89 МПа та при 85 % – 154,46 МПа. Отже, зменшення ступеня ущільнення ґрунтової засипки призводить до підвищення напружень у МГК.

Результати напружено-деформованого стану труби із МГК (*рис. 7*) показують, що найбільші деформації виникають у стінках металевої гофрованої конструкції посередині її прогону. При ступені ущільнення ґрунтової засипки у 85 % найбільше значення прогину труби із МГК становило 64 мм. Проте споруди із МГК є чутливими до зростання зовнішніх динамічних навантажень, внаслідок виникнення нерівності на шляху. Встановлено, що для виникнення пластичних незворотних деформацій МГК зовнішнє навантаження повинно бути перевищене більш, як у 2,48 раза порівняно з навантаженням при проектному стані колії.

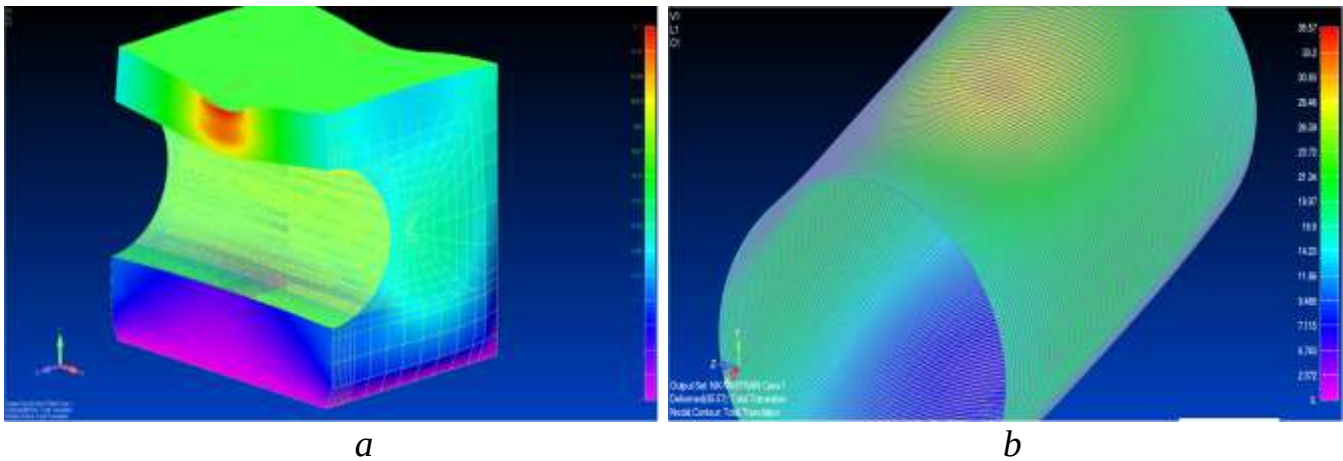


Рис. 7. Напружено-деформований стан споруди із МГК:

a – вигляд споруди із МГК у повздовжньому перерізі; *b* – деформований стан МГК

При ступені ущільнення ґрунтової засипки 97 % несуча здатність труби із МГК забезпечується. Проте при ущільненні ґрунтової засипки нижче 90 % із врахуванням експлуатаційної нерівності колії перевірка умови утворення пластичного шарніру металеві труби не виконується. Тому безпосередньою причиною виникнення залишкових (пластичних) деформацій труби із МГК є зростання напружень у металевих листах до гранично допустимих значень через недостатній ступінь ущільнення ґрунтової засипки та підвищеній динамічній дії рухомих транспортних одиниць.

Механізм зародження залишкових деформацій споруд із МГК наведений на рис. 8. Даний механізм враховує вплив людських і технічних факторів, які можуть у взаємозв'язку призвести до виникнення залишкових деформацій МГК.



Рис. 8. Механізм розвитку залишкових деформацій транспортних споруд із МГК

Четвертий розділ присвячено удосконаленню пристрою та алгоритму для проведення експериментальних досліджень несучої здатності водопропускних труб та шляхопроводів із МГК на статичні і динамічні навантаження та розробці методів оцінки ущільнення ґрунтової засипки цих транспортних споруд.

Дійсний напружено-деформований стан транспортних споруд із МГК можна встановити тільки, маючи дані експериментальних випробувань. Експериментальні

Найнижче значення несучої здатності існує у початковий період експлуатації споруди, безпосередньо після її спорудження, що пов'язано із ущільненням ґрунтової засипки. Цей процес вимагає своєчасного усунення нерівності на колії. Оскільки навіть при недостатньому ущільненні ґрунтової засипки запас несучої здатності становить 58 %. При нормативному ступені ущільнення запас несучої здатності споруд із МГК становить близько 80 %.

випробування труби із МГК були проведені на ділянці Вадул-Сирет-Держкордон Львівської залізниці. Вертикальний діаметр труби 6,2 м, горизонтальний діаметр 6,57 м та товщина стінки 6 мм. Статичні та динамічні навантаження були задані від локомотиву 2М62. Схема розміщення тензодатчиків на опуклій та увігнутій площинах гофри конструкції наведена на *рис. 9*.

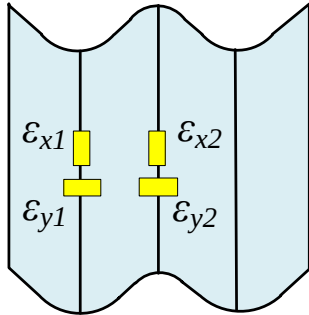


Рис. 9. Схема розміщення тензодатчиків на поверхні металевого гофрованого листа споруди

У результаті вимірювання значень опорів, отримуємо значення деформацій металевих листів конструкції, які переводимо у напруження за формулою:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y), \quad (14)$$

де: ε_x – деформація у радіальному напрямку гофрованого листа конструкції; ε_y – деформація в осьовому напрямку та $\nu=0,3$ – коефіцієнт Пуассона; E – модуль Юнга матеріалу конструкції.

Епюри розподілу напружень у трубі із МГК при статичних та динамічних випробуваннях наведено на *рис. 10*.

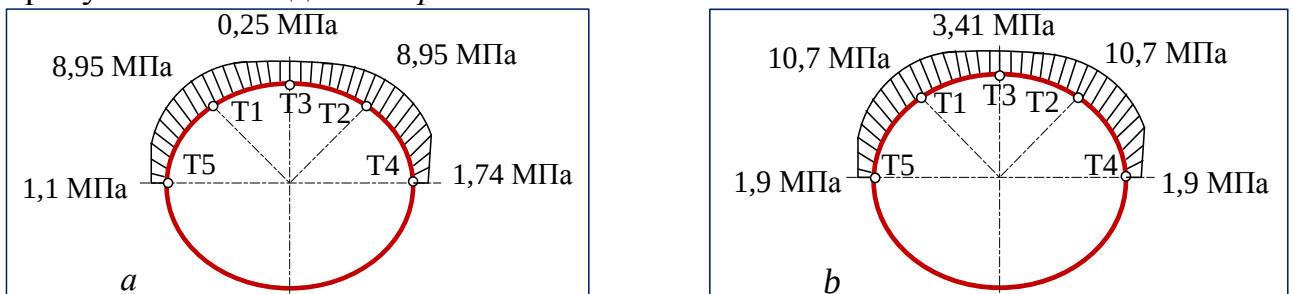


Рис. 10. Епюри розподілу напружень у трубі із МГК:

a – при дії статичного навантаження; *b* – при дії динамічного навантаження

При статичних експериментальних випробуваннях труби встановлено, що вертикальна відносна деформація (прогин) у середній частині труби становить 2,05 мм, а максимальні напруження у верхніх точках труби – 8,95 МПа. При динамічних випробуваннях максимальна вертикальна відносна деформація труби становить 2,74 мм, а горизонтальна 0,77 мм. Максимальні напруження від дії динамічного навантаження у верхній частині труби становили 10,7 МПа.

У 2019 р. були проведені статичні випробування шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій у м. Кропивницькому. Поперечний переріз споруди – еліпс із шириною 9,23 м, висотою 8,12 м та довжиною 34,19 м.

Випробування шляхопроводу здійснювали за двома схемами завантаження (*рис. 11*). Схема №1 – локомотив ЧМЭ 3 масою 123 т + вантажний вагон масою 83,7 т на парній колії та схема №2 – локомотив ЧМЭ 3 масою 123 т + вагон масою 83,7 т на парній колії та локомотив ЧМЭ 3 масою 123 т + вагон масою 86,7 т на непарній колії.

Вимірювальні прилади під час випробувань встановлювали у двох поперечних перерізах шляхопроводу – під парною та непарною коліями. Для заміру деформацій шляхопроводу у вертикальному та горизонтальному напрямках по основних осях еліпса були встановлені прогиноміри системи Аістова 6ПАО, усього 4 шт. Для заміру відносних деформацій металевих листів були встановлені індикатори годинникового типу на базі 200 мм в місцях найбільших відносних деформацій в перерізах шляхопроводу.



Рис. 11. Процес експериментальних випробувань шляхопроводу із МГК

Результати експериментальних досліджень показали, що максимальні вертикальні переміщення (прогини) шляхопроводу при статичному навантаженні за схемою №2 склали $f_{max,st}=1,45$ мм, а відносна зміна вертикального розміру шляхопроводу при вертикальному діаметрі $D_V=8120$ мм становила $f_{max,st}/D_V=0,02$ %.

Для проведення випробувань шляхопроводу із МГК на км 228+160 автомобільної дороги Київ–Харків–Довжанський під правим і лівим проїздами автомобільної дороги для заміру деформацій МГК було встановлено прогиноміри системи Аістова 6ПАО, по 2 штуки в кожному напрямку. Для заміру відносних деформацій були встановлені індикатори годинникового типу на базі 200 мм на рівні горизонтальної осі шляхопроводу, по 2 шт. з кожного боку (рис. 12).

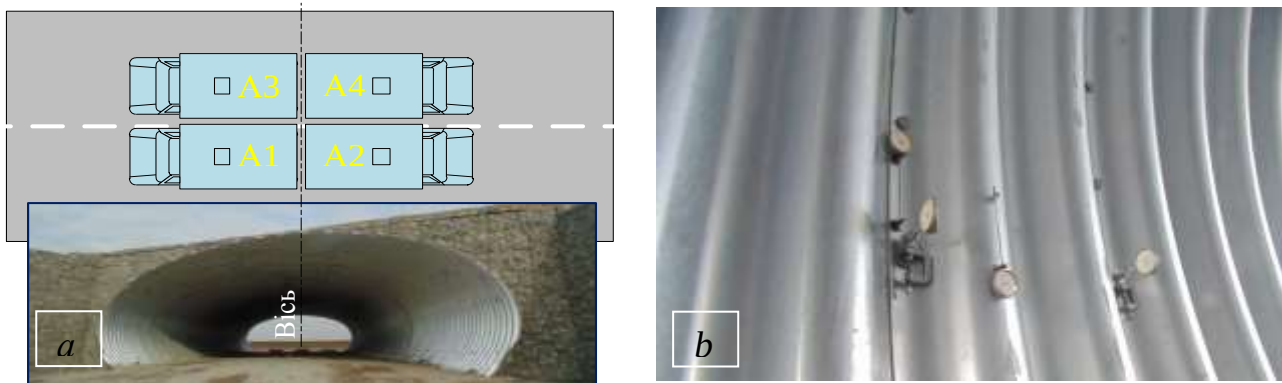


Рис. 12. Процес експериментальних випробувань шляхопроводу із МГК на км 228+160 автомобільної дороги Київ–Харків–Довжанський: а – схеми завантаження шляхопроводу; б – розміщення прогиномірів на МГК

У результаті статичних випробувань шляхопроводу із МГК максимальний прогин отримано при завантаженні його чотирма автосамоскидами. Величина прогину по осі z складала $f_{max,st}=1,65$ мм, а при скінченно-елементному моделюванні – 1,57 мм.

З метою перевірки адекватності розроблених теоретичних моделей оцінки несучої здатності споруд із МГК проведено порівняння результатів отриманих за допомогою удосконаленої аналітичної моделі, розробленого алгоритму скінченно-

елементного моделювання із експериментальними даними (табл. 4). Для порівняння результатів взято геометричні та фізико-механічні параметри транспортних споруд із МГК, які експлуатуються на: 310 км дільниці Вадул-Сирет–Держжордон; 228 км автомобільної дороги Київ–Харків–Довжанський та у м. Кропивницькому.

Навантаження задано від рухомих транспортних одиниць, які використовувалися при проведенні статичних експериментальних досліджень споруд із МГК. Прийнято, що ступінь ущільнення ґрунтової ущільнюючої засипки становить $RP=97\%$, а залізнична колія та автомобільна дорога знаходяться у технічно справному стані.

Таблиця 4

Порівняння результатів визначених різними методами

№п/п	Споруда із МГК	Тип конструкції	Висота ґрунтової засипки	Удосконалена аналітична методика	Метод Петерсона	Метод скінченних елементів		Експериментальні дані	
				σ , МПа	σ , МПа	σ , МПа	f , мм	σ , МПа	f , мм
1	310 км Вадул-Сирет–Держжордон	MultiPlate MP 150x50x6	1,88	9,78	7,33	8,2	2,12	8,95	2,05
Збіжність із експериментальними даними, %				8,5	18,1	8,4	3,3	-	-
2	228 км автомобільної дороги Київ–Харків–Довжанський	SuperCor 380x140x7	2,00	4,61	-	4,77	1,57	4,2	1,65
Збіжність із експериментальними даними, %				8,9	-	11,9	4,8	-	-
3	Шляхопровід із МГК м. Кропивницький	SuperCor 380x140x6	2,57	8,56	7,01	8,1	1,31	-	1,45
Збіжність із експериментальними даними, %				-	-	-	9,7	-	-

Напруження та прогини, визначені експериментальним шляхом, знаходяться в інтервалі 3–11 % від розрахованих теоретично (аналітичний та числовий розрахунки), що свідчить про правильність прийнятих у розрахунках передумов. Тому удосконалена аналітична методика оцінки несучої здатності споруд із МГК великого поперечного перетину та алгоритм скінченно-елементного моделювання таких споруд рекомендуються для подальшого практичного застосування з метою оцінки несучої здатності споруд із МГК.

Слід зазначити, що при розрахунку напружень МГК діаметром 6 м методом Петерсона збіжність результатів із експериментальними становить до 20 %, а при діаметрі споруд із МГК 10 м і більше обчислити напружений стан МГК є неможливим.

Несуча здатність транспортних споруд із МГК у значній мірі залежить від ступеня ущільнення ґрунтової засипки. Тому для оцінки ступеня ущільнення ґрунтової засипки в лабораторних умовах розроблено пристрій SeismoDens (рис. 13, а). Пристрій складається із двох мікроконтролерів типу ESP-32, на які покладено завдання управління та створення імпульсів, отримання числових та оцифровка аналогових сигналів із датчиків, попередня обробка, оцінка та збереження інформації із виводом на екран даних про хід виконання роботи. В основі пристрою лежить принцип визначення ущільнення ґрунтової засипки за швидкістю проходження пружних хвиль через неї. Швидкість залежить від відстані між джерелом імпульсу та часу проходження пружної хвилі. Запис швидкості поширення пружних хвиль у трьох циклах експерименту наведено на рис. 13, б.

Елементами периферії є три електромагнітних шейкери (S_1 , S_2 , S_3) для створення серій імпульсів у трьох точках поверхні ґрунтової засипки.

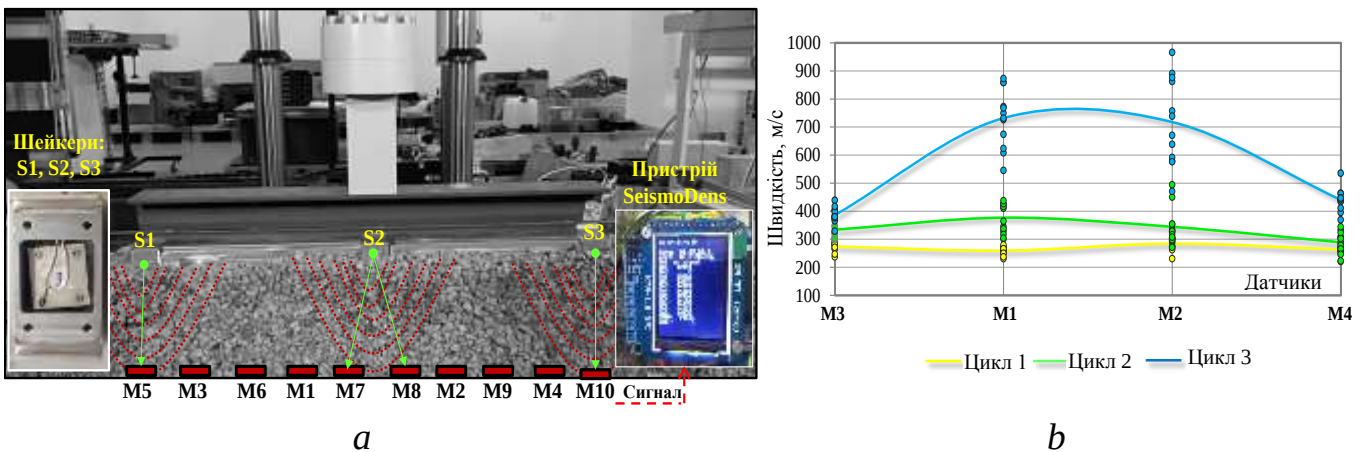


Рис. 13. Пристрій для лабораторних експериментальних досліджень ущільнення ґрунтової засипки (а) та швидкості поширення пружної хвилі удару (б)

У якості датчиків використано мікрофони звуку MEMS типу ADMP 401 та трьохосьові акселерометри ADXL 335.

Лабораторні дослідження становили послідовність циклів ущільнення ґрунтової засипки та вимірювань імпульсного відклику. Цими дослідженнями встановлено, що зміна середніх швидкостей хвиль в експерименті знаходиться у діапазоні від 157 м/с – для початкового неущільненого стану щебеневої засипки і до 732 м/с – для максимально ущільненої щебеневої засипки, досягнутої в останньому циклі експериментальних досліджень.

Для вимірювання ущільнення ґрунтової засипки в умовах будівництва транспортних споруд із МГК запропоновано пристрій SeismoSoil (рис. 14).

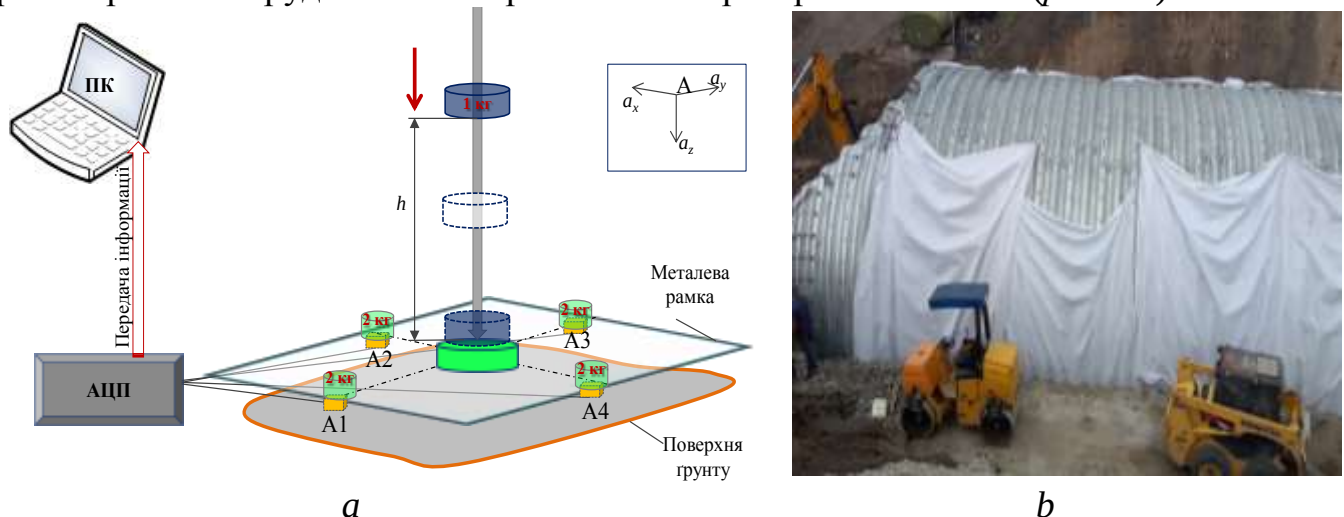


Рис. 14. Пристрій для вимірювання (а) та процес ущільнення (б) ґрунтової засипки

Пристрій складається із чотирьох датчиків прискорень ADXL 335 (A1, A2, A3, A4), які вмонтовані у спеціально розроблені коробки і закріплені у поперечному та повздовжньому напрямку до рами пристрою на відстані 50 см від джерела імпульсу та стержня, по якому із висоти $h=50$ см опускається вантаж масою 1,0 кг і виникає пружна хвиля у ґрунтовій засипці. Для реєстрації хвиль ударів та імпульсу використовується аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) L-Card, який виконує записи сигналів із частотою 30,0 кГц.

Записи пружних хвиль ударів (рис. 15) передаються на комп'ютер, і далі за допомогою спеціального запрограмованого алгоритму виконується їх обробка.

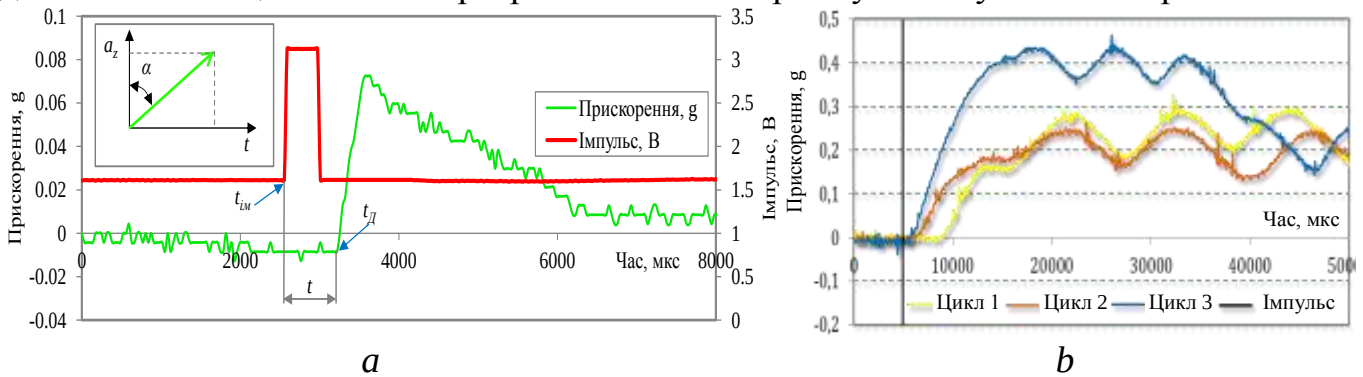


Рис. 15. Схема для визначення часу поширення пружної хвилі удару (a) та часу поширення пружної хвилі удару у трьох циклах експерименту (b)

Даний алгоритм ґрунтується на визначенні різниці між моментом часу початку запису хвилі датчиком t_d та початком задання імпульсу t_{im} :

$$t = t_d - t_{im}. \quad (15)$$

Результати експериментальних вимірювань швидкості проходження пружної хвилі удару через щебенево-піщану засипку показали, що при неуцільненому стані швидкість становить 170,05 м/с, а при максимальному пошаровому ущільненні досягнуто швидкість 775,35 м/с.

Максимальна досягнута швидкість проходження пружних хвиль удару у чотири рази вища, аніж у початковому неуцільненому стані. Тому розроблений метод має практичне значення, оскільки за отриманими значеннями швидкостей поширення хвиль ударів у залежності від ступеня ущільнення ґрунтової засипки можна оцінювати якість ущільнення ґрунтової засипки транспортних споруд із МГК під час їх спорудження. Забезпечення нормативного ступеня ущільнення ґрунтової засипки призведе до підвищення несучої здатності транспортних споруд із МГК.

П'ятий розділ присвячено експериментальним вимірюванням розподілу температур на поверхнях металевих гофрованих конструкцій та розробці методів оцінки температурного поля і термопружного стану транспортних споруд із МГК.

Для оцінки дії особливостей та рівня температури від змінних кліматичних впливів на несучу здатність споруд із МГК були проведені експериментальні вимірювання розподілу температури на зовнішній поверхні металевого гофрованого листа споруди у різні пори року та години доби. Вимірювання розподілу температур здійснювалося тепловізором Testo 875-1 та пірометром НТ-822. Температура навколишнього середовища контролювалася за допомогою електронного анемометра TENMARS TM-740. Процес проведення експериментальних вимірювань температури наведено на рис. 16, а вигляд поля розподілу температурного градієнту на зовнішній стороні металевого гофрованого листа конструкції при температурі навколишнього середовища +14°C наведено на рис. 17.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що температура на поверхнях металевих гофрованих листів конструкції розподіляється нерівномірно. Різниця температур між нижньою та верхньою поверхнями листа становить +7,1°C – при максимальних додатних температурах навколишнього середовища та -5,5°C – при мінімальних від'ємних температурах. Тому при розрахунку таких конструкцій

необхідно враховувати нерівномірний розподіл температури на поверхні металевих гофрованих конструкцій.

Встановлено, що при ясній погоді та у випадку хмарності температура розподіляється рівномірно із коливанням температур, залежно від впадини чи виступу гофри конструкції, у межах $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальне додатне значення температури на поверхні металевих гофрованого листа споруди зафіксовано величиною $+38,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а мінімальне від'ємне – $-28,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рис. 16. Процес проведення вимірювань температури на поверхні металевих гофрованої конструкції споруди

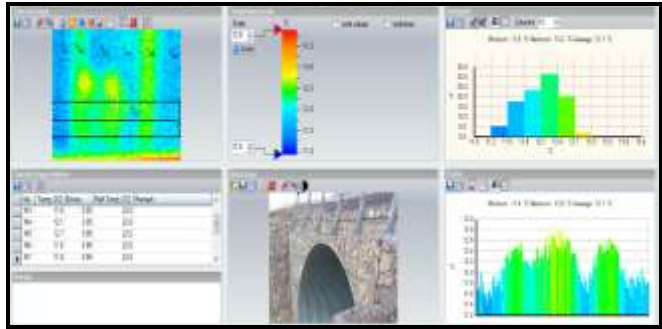


Рис. 17. Температурний градієнт на зовнішній стороні металевих гофрованого листа транспортної споруди

Далі було розв'язано задачу, у якій невідомий розподіл температури у двовимірній однозв'язній опуклій фізично неоднорідній області P з кусково-гладкою границею. Задано значення температури в окремих точках області P та на її границях. Увівши систему координат xOy в області P , розподіл температурного поля визначаємо, як функцію двох змінних $T(x, y)$. Накладемо на область P регулярну координатну сітку з кроком h_x по координаті x та кроком h_y по координаті y . Позначимо через $T_{i,j} = T(x_i, y_j)$, де $(x_i, y_j) \in P$ – вузлові точки сітки, що потрапили в область P . Вважається, що в окремих точках $(x_i^*, y_j^*) \in P$ значення температури задаються, а для решти точок $(x_i, y_j) \in P$ визначаємо з умови мінімуму функціоналу $\Omega(T)$, який після дискретизації наближаємо функцією:

$$\Omega(T) = \sum_i \sum_j \lambda_{i,j} \left[\left(\frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{h_x} \right)^2 + \left(\frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{h_y} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Для знаходження скінченної кількості невідомих значень температури використаємо умову мінімуму квадратичної функції $\Omega(T)$. Прирівняємо до нуля похідні $\Omega(T)$ для невідомих значень $T_{i,j}$ і отримаємо для кожної з них рівняння:

$$T_{i,j} \left(\frac{\lambda_{i,j}}{h_x^2} + \frac{\lambda_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{\lambda_{i,j}}{h_y^2} + \frac{\lambda_{i,j+1}}{h_y^2} \right) = \frac{\lambda_{i,j}}{h_x^2} T_{i-1,j} + \frac{\lambda_{i+1,j}}{h_x^2} T_{i+1,j} + \frac{\lambda_{i,j}}{h_y^2} T_{i,j-1} + \frac{\lambda_{i,j+1}}{h_y^2} T_{i,j+1}, \quad (17)$$

де $\lambda_{i,j} = \lambda(x_i, y_j)$. Звідси невідоме $T_{i,j}$ визначається через значення у сусідніх вузлах за формулою:

$$T_{i,j} = \left(\frac{\lambda_{i,j}}{h_x^2} + \frac{\lambda_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{\lambda_{i,j}}{h_y^2} + \frac{\lambda_{i,j+1}}{h_y^2} \right)^{-1} \left(\frac{\lambda_{i,j}}{h_x^2} T_{i-1,j} + \frac{\lambda_{i+1,j}}{h_x^2} T_{i+1,j} + \frac{\lambda_{i,j}}{h_y^2} T_{i,j-1} + \frac{\lambda_{i,j+1}}{h_y^2} T_{i,j+1} \right). \quad (18)$$

У випадку однорідної області P , коли $\lambda(x, y) = \text{const}$, формула набуває вигляду:

$$T_{i,j} = \left(\frac{2}{h_x^2} + \frac{2}{h_y^2} \right)^{-1} \left[\frac{1}{h_x^2} (T_{i-1,j} + T_{i+1,j}) + \frac{1}{h_y^2} (T_{i,j-1} + T_{i,j+1}) \right], \quad (19)$$

і при $h_x = h_y$, отримуємо формулу

$$T_{i,j} = \frac{1}{4} (T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + T_{i,j-1} + T_{i,j+1}). \quad (20)$$

Виходячи з деякого початкового наближення температури в області, а отже і у вузлах регулярної сітки, послідовно змінюючи i, j для вузлів, де значення $T_{i,j}$ невідомі, організовуємо ітераційний процес послідовного наближення до шуканих значень температури. У тих вузлах, де значення температури задаються, їх залишаємо незмінними. Результати розподілу температури на поверхнях металевій гофрованої конструкції наведені на *рис. 18*.

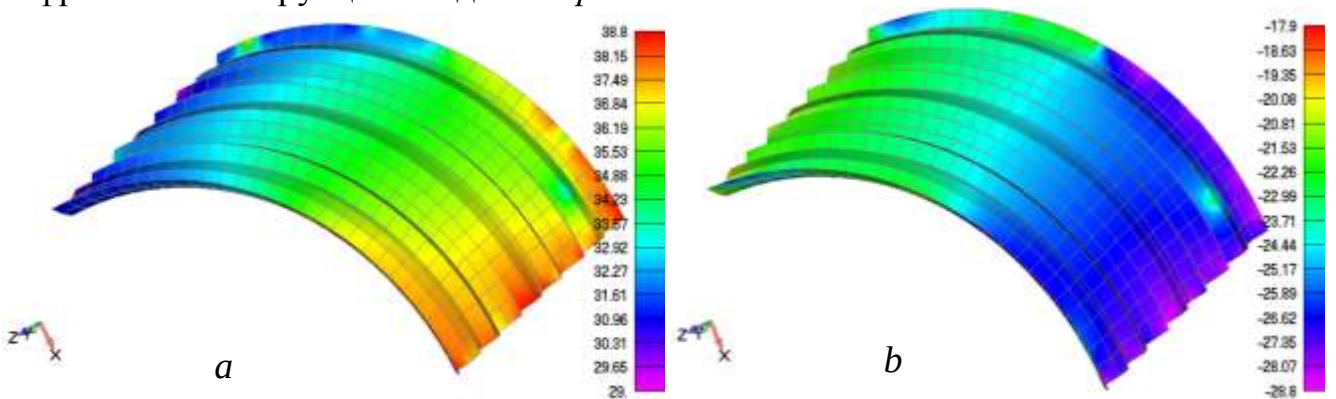


Рис. 18. Результати розрахунку температурного поля при максимальних додатних (а) та при мінімальних від'ємних (b) температурах навколишнього середовища

Із проведених результатів розподілу температурного поля при максимальних додатних температурах навколишнього середовища встановлено, що на нижній поверхні конструкції температура змінюється від $+38,8^{\circ}\text{C}$ до $+37,0^{\circ}\text{C}$. Далі у напрямку знизу вверх температура поступово знижується до значень від $+29,4^{\circ}\text{C}$ до $+32,7^{\circ}\text{C}$. При мінімальних від'ємних температурах навколишнього середовища на нижній поверхні гофрованої конструкції температура змінюється від $-28,8^{\circ}\text{C}$ до $-26,3^{\circ}\text{C}$, а на верхній границі конструкції значення температури коливаються від $-19,4^{\circ}\text{C}$ до $-22,8^{\circ}\text{C}$.

Результати розподілу напружень, які виникають при максимальних додатних та мінімальних від'ємних температурах навколишнього середовища, наведені на *рис. 19*.

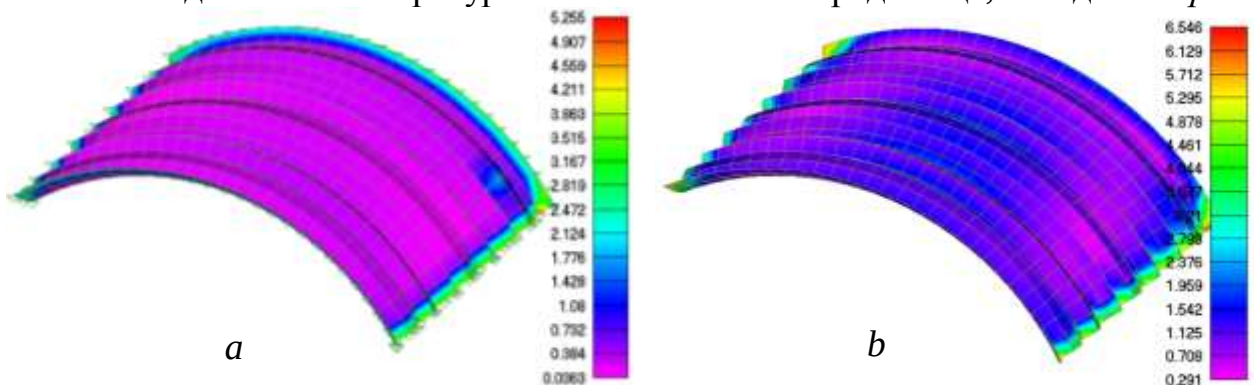


Рис. 19. Термопружний стан при заданні температури на границях конструкції при максимальних додатних (а) та при мінімальних від'ємних (b) температурах навколишнього середовища

Напруження, що спричинені температурними перепадами навколишнього середовища, досягають максимальних значень у випадку обмеження переміщень гофрованого листа споруди на торцях. Величина напружень при заданих умовах закріплення гофрованої конструкції становить 5,26 МПа при виміряних максимальних додатних температурах влітку і 6,55 МПа при виміряних мінімальних значеннях температур взимку. Встановлено, що величина напружень, яка виникає у спорудах із МГК при дії змінних кліматичних температурних перепадів навколишнього середовища, становить до 10 % від допустимих значень напружень.

У **шостому розділі** наведено конструктивні варіанти підвищення несучої здатності споруд із МГК. Розроблено засоби відновлення та методи оцінки несучої здатності пошкоджених транспортних споруд із МГК, підсилених ребрами жорсткості. Розроблено аналітичну модель оцінки термопружного стану багатошарової кусково-однорідної оболонки, яка утворюється у випадку ремонту дефектної залізобетонної споруди методом застосування МГК.

Безпечна експлуатація споруд із МГК у тілі насипу залізничної колії чи автомобільної дороги визначається співвідношенням параметрів несучої здатності споруд із МГК R і навантаженням Q , що діють від рухомих транспортних одиниць. Відношення R до Q буде визначати коефіцієнт запасу несучої здатності:

$$n=R/Q. \quad (21)$$

Для забезпечення несучої здатності, а відповідно і безпечної експлуатації споруд із МГК, запропоновано конструктивні варіанти із встановлення металевих ребер жорсткості по контуру увігнутої частини гофрованого профілю МГК (рис. 20, а, б).

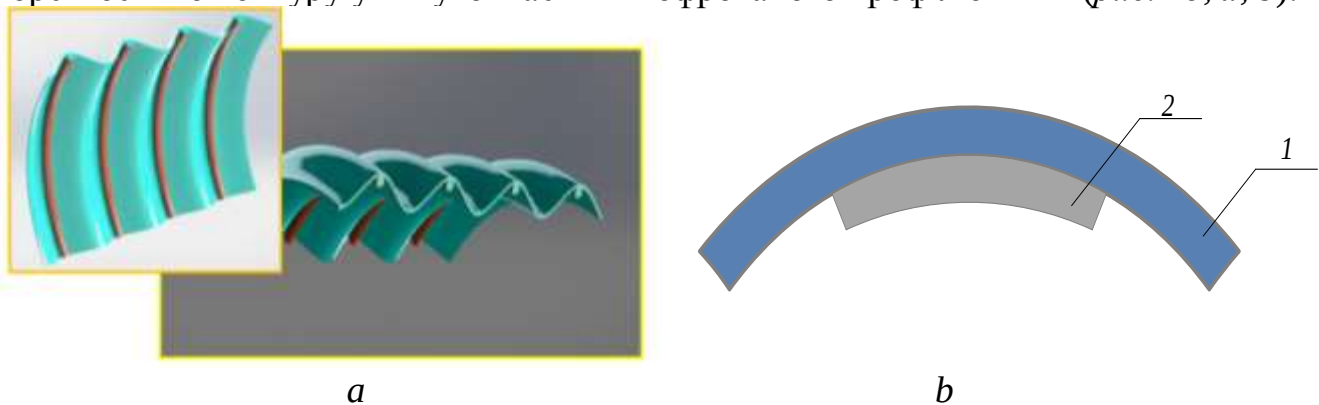


Рис. 20. Підсилення споруд із МГК круглими ребрами жорсткості (а) та накладними пластинами (б): 1 – існуюча металева гофрована конструкція; 2 – металева накладна пластина

Встановлення ребер жорсткості необхідно проводити таким чином, щоб зона підсилення споруди займала ширину проїжджої частини автомобільної дороги чи залізничної колії. При цьому вони повинні працювати спільно із металевим гофрованим листом конструкції.

Розглянемо пружну гофровану циліндричну оболонку, віднесену до циліндричної системи координат r, φ, z ($0 \leq \varphi < 2\pi$). Переріз цієї конструкції у напрямку координати z наведений на рис. 21.

Внутрішня S_1 та зовнішня S_2 поверхні оболонки відповідно описуються рівняннями:

$$r = r_1 + \varepsilon \sin \alpha z; \quad r = r_2 + \varepsilon \sin \alpha z. \quad (22)$$

Оболонка вздовж ліній

$$\begin{cases} r = r_1 + \varepsilon, \\ z = \frac{\pi}{a} \left(\frac{1}{2} + 2n \right) \end{cases} \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (23)$$

підсилена круглими ребрами жорсткості, які займають області:

$$(V_n) = \left\{ (r, \varphi, z) : r_0 - \sqrt{R^2 - (z - z_{0n})^2} \leq r \leq r_0 + \sqrt{R^2 - (z - z_{0n})^2}, 0 \leq \varphi < 2\pi, z_{0n} - R \leq z \leq z_{0n} + R \right\}, \quad (24)$$

де: $r_0 = r_1 + \varepsilon - R$; $z_{0n} = \frac{\pi}{a} \left(\frac{1}{2} + 2n \right)$; R – радіус круга, який є поперечним перерізом ребра жорсткості.

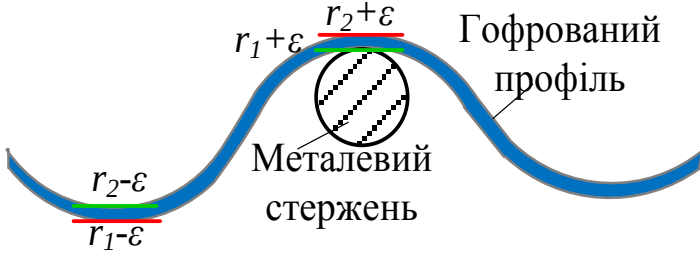


Рис. 21. Схема до опису математичної моделі гофрованої оболонки споруди підсиленої ребрами жорсткості

Оболонка перебуває під дією зусиль $P_r(\varphi, z)$, $P_z(\varphi, z)$, прикладених до зовнішньої поверхні S_2 . Внутрішня поверхня S_1 і підсилювальні ребра жорсткості, за винятком ліній (23), вільні від навантажень. Бокові поверхні $z = \pm l$ оболонки також вільні від навантажень. Припускаємо, що на лініях (23) виконуються умови ідеального механічного контакту оболонки з кільцями.

Для визначення напружено-деформованого стану металевої гофрованої оболонки та ребер жорсткості використаємо рівняння та співвідношення теорії пружності. Рівняння рівноваги елементарного об'єму розглядуваних тіл мають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{\varphi z}}{\partial z} + \frac{2\sigma_{r\varphi}}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\varphi z}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} &= 0, \end{aligned} \quad (25)$$

де σ_{ij} ($i, j = r, \varphi, z$) – компоненти тензора напружень.

Граничні умови на торцях металевої гофрованої оболонки запишемо у наступному вигляді:

$$\sigma_{rz} \big|_{z=\pm l} = 0, \quad \sigma_{\varphi z} \big|_{z=\pm l} = 0, \quad \sigma_{zz} \big|_{z=\pm l} = 0, \quad (26)$$

де n_r, n_z – напрямні косинуси векторів одиничних зовнішніх нормалей до поверхонь розглядуваних тіл.

Поверхні S_1 відповідають величини:

$$n_r = -\frac{1}{\Delta}, \quad n_z = \frac{\varepsilon a \cos az}{\Delta}, \quad (27)$$

а поверхні S_2 – величини:

$$n_r = \frac{1}{\Delta}, \quad n_z = -\frac{\varepsilon a \cos az}{\Delta}. \quad (28)$$

У формулах (27) та (28) величина Δ визначається за формулою:

$$\Delta = \sqrt{1 + (\varepsilon a \cos az)^2}. \quad (29)$$

Тим частинам поверхонь ребер жорсткості, які описуються рівнянням $r = r_0 + \sqrt{R^2 - (z - z_{0n})^2}$, відповідають значення:

$$n_r = \frac{\sqrt{R^2 - (z - z_{0n})^2}}{R}, \quad n_z = \frac{z - z_{0n}}{R}, \quad (30)$$

а частинам поверхонь ребер жорсткості, які задаються рівнянням $r = r_0 - \sqrt{R^2 - (z - z_{0n})^2}$, – значення:

$$n_r = -\frac{\sqrt{R^2 - (z - z_{0n})^2}}{R}, \quad n_z = \frac{z - z_{0n}}{R}. \quad (31)$$

Для оцінки ефективності даних конструктивних рішень запропоновано комплексний показник ефективності:

$$e = \sigma_e + E_e, \quad (32)$$

де: σ_e – технічний показник ефективності конструктивного рішення, який враховує максимальні напруження; E_e – коефіцієнт, що враховує вартість базового технічного рішення і збільшення обсягу та вартості будівельно-монтажних робіт.

Технічний показник за максимальними напруженнями розраховуємо за відношенням допустимих напружень $[\sigma]$, які не перевищують межу пружності металу конструкції до максимальних напружень σ_{max} отриманих при розрахунку споруд із МГК, підсилених запропонованим конструктивним варіантом:

$$\sigma_e = \frac{[\sigma]}{\sigma_{max}}. \quad (33)$$

Коефіцієнт, що враховує вартість базового технічного рішення K та збільшення обсягу будівельно-монтажних робіт k , визначається за формулою:

$$E_e = \frac{K}{K + k}. \quad (34)$$

Із проведених розрахунків встановлено, що найбільш ефективними техніко-економічними варіантами підвищення несучої здатності споруд із МГК є конструктивні варіанти підсилення методом встановлення ребер жорсткості у вигляді накладної пластини та круглого ребра жорсткості. Дані конструктивні варіанти забезпечують несучу здатність пошкоджених споруд із МГК та є одночасно найкращими варіантами у співвідношенні ціна/якість.

У результаті ремонту дефектних залізобетонних споруд методом «гільзування» із використанням МГК отримуємо багат шарову споруду. Кожен шар її відрізняється один від одного фізико-механічними характеристиками. Розглянемо кусково-однорідну тришарову циліндричну оболонку, внутрішня частина якої – металева гофрована конструкція 1, зовнішня – залізобетонна споруда 3, а простір між ними заповнено новим бетоном 2 (рис. 22).

Припустимо, що оболонка займає область

$$(V) = \{(r, \varphi, z) : a \leq r \leq b, 0 \leq \varphi < 2\pi, 0 \leq z \leq l\}, \quad (35)$$

де r, φ, z – циліндрична система координат.

Розподіл температури у тришаровій оболонці визначаємо за рівняннями:

$$t = \begin{cases} C_1 \ln r + C_2 & \text{при } a \leq r \leq r_1, \\ C_3 \ln r + C_4 & \text{при } r_1 < r \leq r_2, \\ C_5 \ln r + C_6 & \text{при } r_2 < r \leq b. \end{cases} \quad (36)$$

Напружено-деформований стан такої оболонки визначаємо за рівняннями:

$$\sigma_{rr} = (2\mu + \lambda) \frac{du_r}{dr} + \lambda \frac{u_r}{r} - \beta t, \quad \sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{rr} - 2\mu \left(\frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r} \right), \quad \sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{du_r}{dr} + \frac{u_r}{r} \right) - \beta t. \quad (37)$$

$$\text{де: } \lambda_i = \frac{E_i \nu_i}{(1 + \nu_i)(1 - 2\nu_i)}; \quad \mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)}; \quad \beta_i = \alpha_i (3\lambda_i + 2\mu_i).$$

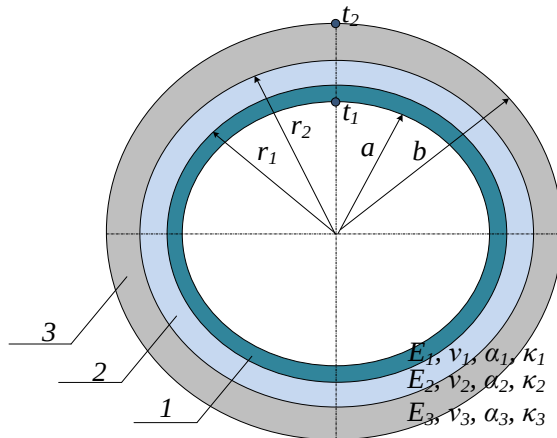


Рис. 22. Модель для розрахунку температурного поля та напружень тришарової споруди із МГК

Числові дослідження температурного поля та напружень здійснимо за значеннями параметрів: $a=1000$ мм; $r_1=1006$ мм; $r_2=1156$ мм; $b=1306$ мм; $\kappa_1=45$ Вт/(м·°С) (відповідає сталі Ст-3); $\kappa_2=1,51$ Вт/(м·°С) (відповідає новому бетону); $\kappa_3=1,69$ Вт/(м·°С) (відповідає старому бетону); $E_1=2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\nu_1=0,3$; $\alpha_1=1,25 \cdot 10^{-5}$ 1/°С; $E_2=3,6 \cdot 10^4$ МПа; $\nu_2=0,25$; $\alpha_2=1,0 \cdot 10^{-5}$ 1/°С; $E_3=3,9 \cdot 10^4$ МПа; $\nu_3=0,25$; $\alpha_3=1,0 \cdot 10^{-5}$ 1/°С і різних значень t_1 та t_2 .

Результати досліджень напруженого стану оболонки при максимальних і мінімальних значеннях температури навколишнього середовища показали, що радіальні напруження σ_{rr} при максимальних значеннях температури становлять 0,23 МПа, а при мінімальних значеннях температури – 0,18 МПа. Осьові напруження σ_{zz} при максимальних значеннях температури становлять 101,0 МПа, а при мінімальних значеннях температури – 78,0 МПа (рис. 23). Кільцеві напруження $\sigma_{\varphi\varphi}$ при максимальних значеннях температури становлять 39,0 МПа, а при мінімальних значеннях температури – 28,0 МПа.

Доведено, що рівень радіальних напружень є незначним і не впливає на загальний напружений стан транспортної багатошарової сталобетонної споруди. Проте осьові напруження становлять до 40 % від допустимих значень напружень у відповідних конструктивних елементах споруди.

Напруження, зумовлені температурним полем і змінними транспортними навантаженнями, можуть перевищувати допустимий рівень напружень у багатошаровій сталобетонній споруді. Тому для ефективного ремонту дефектних транспортних споруд методом застосування металевих гофрованих конструкцій

рекомендується проводити оцінку рівня температурного поля та напруженого стану споруд у залежності від кліматичних температурних перепадів району будівництва.

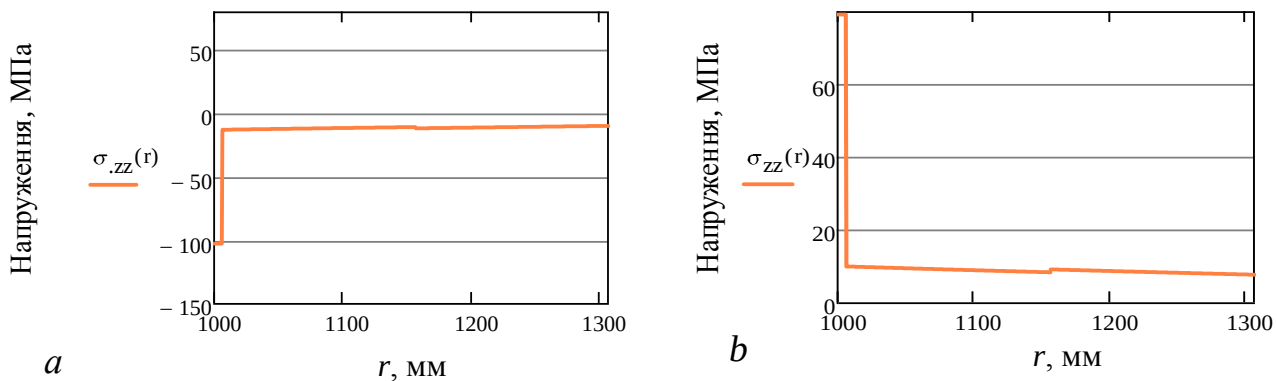


Рис. 23. Розподіл осевих напружень σ_{zz} : *a* – при максимальних значеннях температури; *b* – при мінімальних значеннях температури

У цьому розділі подано розробку інерційної системи моніторингу технічного стану транспортних споруд із МГК. Проведено експериментальні динамічні випробування шляхопроводу із МГК при проїзді транспортних одиниць.

Для підвищення несучої здатності споруд із МГК, які експлуатуються на залізничній колії чи автомобільній дорозі, необхідно на початковому етапі експлуатації проводити постійний моніторинг технічного стану, що є можливим за допомогою стаціонарних систем контролю. Неперервну онлайн діагностику технічного стану транспортних споруд із МГК пропонується виконувати із застосуванням сучасних інформаційних технологій Internet of things (Iot). Вимірювання параметрів динамічної взаємодії, їх аналогово-цифрове перетворення здійснюється на основі програмованих Wi-Fi мікроконтролерів типу ESP-32. Далі дані надсилаються на Вебсервер (рис. 24).

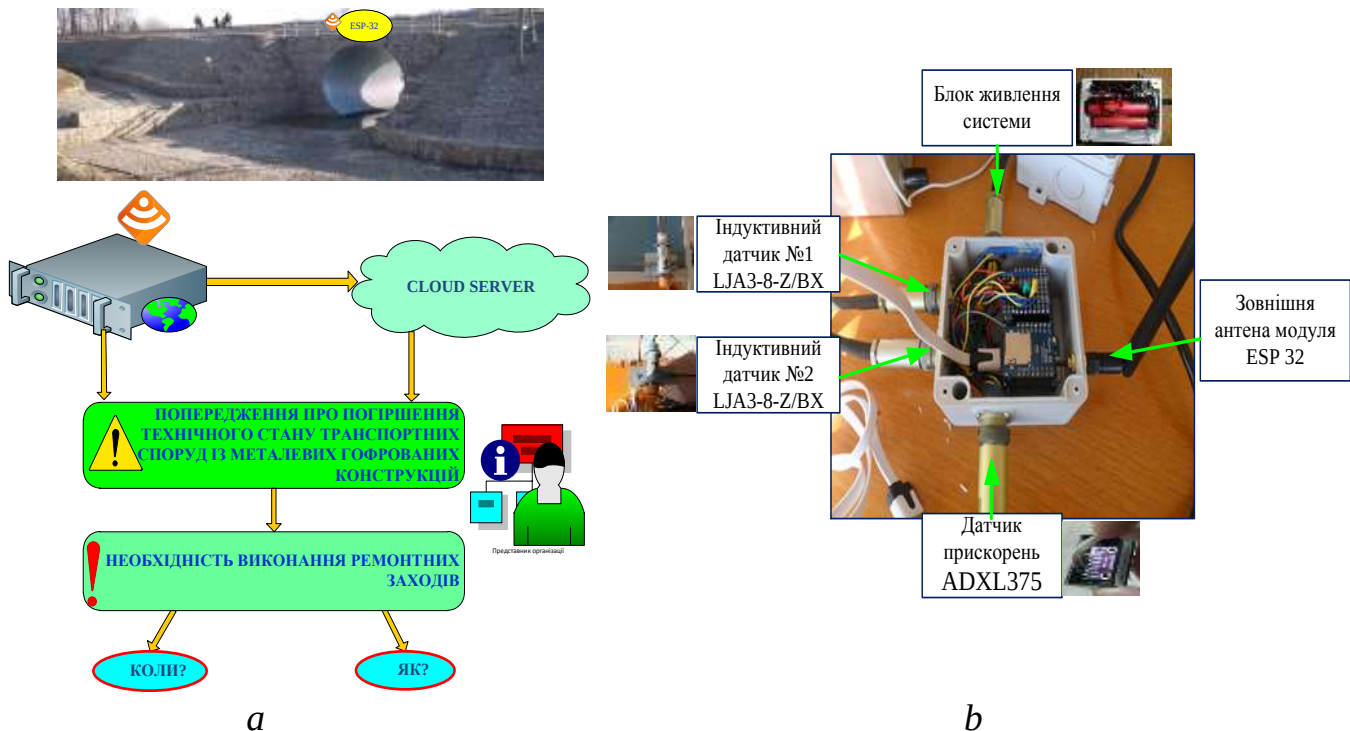


Рис. 24. Структурна схема (*a*) та інерційна система (*b*) моніторингу технічного стану транспортних споруд із МГК

Збір інформації вебсервером виконується на основі мікрокомп'ютерної системи типу RASBERRI Pi2 з операційною системою DEBIAN Linux. Даною системою виконується попередня обробка зібраних даних та підготовка у зручний для користувача вигляд із відправкою основних даних на Cloud Server для накопичення результатів довготривалого моніторингу технічного стану транспортних споруд із МГК.

За допомогою запропонованої системи було проведено експериментальні інерційні випробування шляхопроводу із МГК, який експлуатується під залізничною колією і пропускає автомобільний транспорт (рис. 25, а, б).

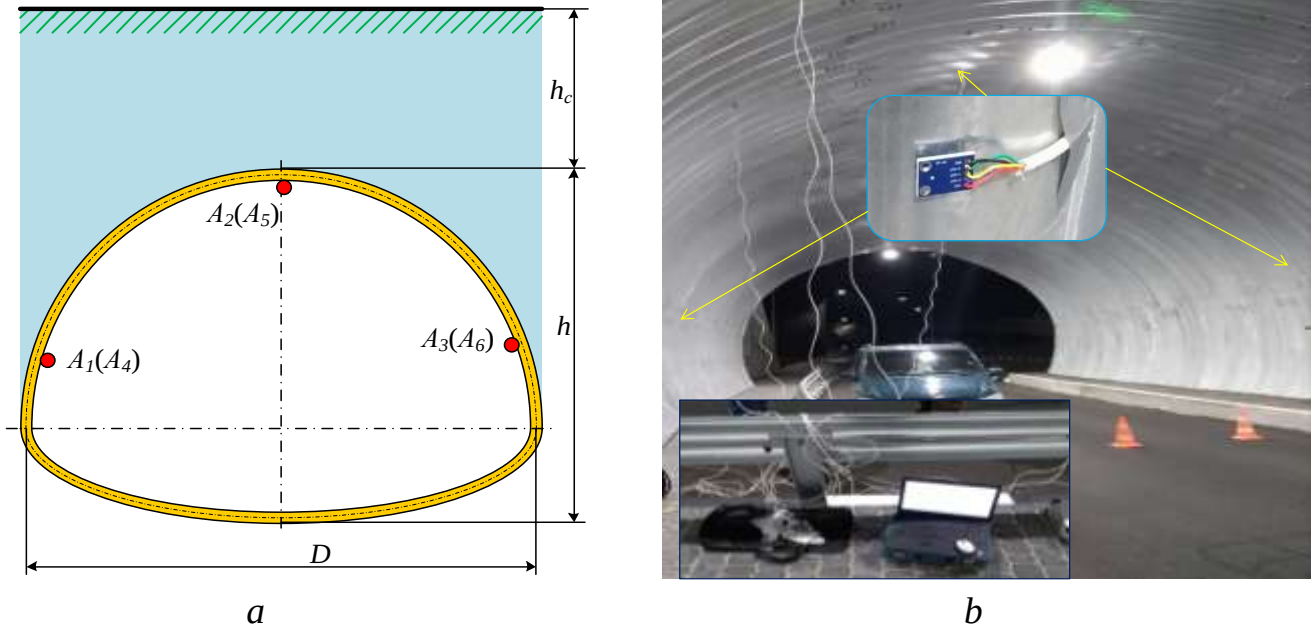


Рис. 25. Схема розміщення датчиків прискорень (а) та процес проведення інерційних випробувань шляхопроводу із МГК (б)

Експеримент полягав у тому, що за допомогою інерційної системи отримували значення прискорень, які надалі оброблялися за допомогою авторської програми і визначалися переміщення вершини та бокових горизонтальних сторін металевої гофрованої конструкції шляхопроводу.

Було реалізовано дві схеми розміщення датчиків. Схема 1 – датчики (А1–А3) розміщені під віссю непарної колії та схема 2 – датчики (А4–А6) розміщені під віссю парної колії. Два датчики були розміщені у вершині конструкції шляхопроводу та чотири на бокових горизонтальних сторонах конструкції шляхопроводу.

Програма експериментальних досліджень передбачала вимірювання прискорень при проїзді поїздів, які рухаються магістральною залізницею за графіком у напрямку Котовськ–Знам'янка і навпаки.

Вигляд ліній запису прискорень, які виникають у вершині металевої гофрованої конструкції шляхопроводу при проїзді вантажного поїзда, наведено на рис. 26.

Із ліній запису прискорень (рис. 26), які виникають у металевій гофрованій конструкції шляхопроводу, відслідковуються ділянки прискорень, які виникають від тягового рухомого складу та вагонів, які йдуть за ним. Максимальні значення прискорень виникають від тягового рухомого складу і вдвічі менші від вантажних вагонів.

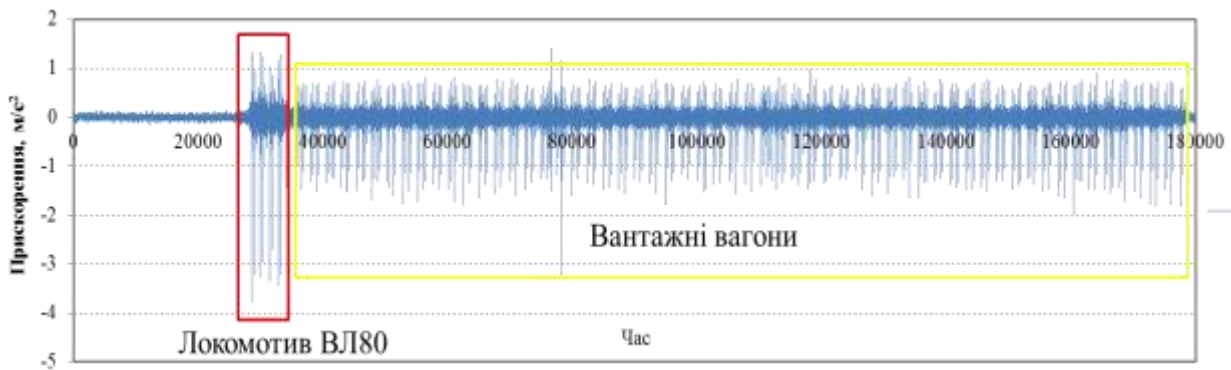


Рис. 26. Прискорення у вершині металевої гофрованої конструкції шляхопроводу при проїзді вантажного поїзда

Запис переміщень, які виникають у металевій гофрованій конструкції шляхопроводу від дії рухомого складу (рис. 27), показує, що конструкція під навантаженням прогинається і цей прогин присутній поки поїзд не з'їде із шляхопроводу. На початку і вкінці лінії запису переміщень конструкції спостерігаються пікові значення, а між ними переміщення є меншими і спрямовані до низу. Це, у свою чергу, пояснюється гнучкістю таких конструкцій під дією навантажень і перерозподілом згинальних моментів.

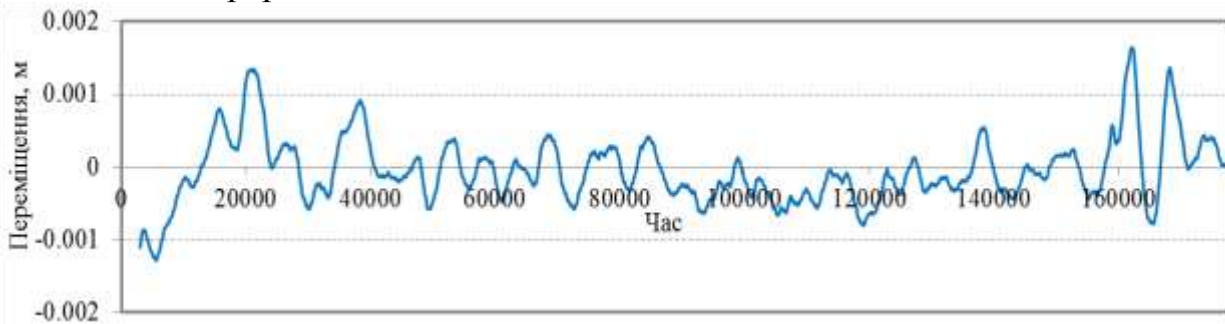


Рис. 27. Переміщення вершини металевої гофрованої конструкції шляхопроводу при проїзді вантажного поїзда

Максимальні значення прискорень, які виникають у шляхопроводі із МГК при проїзді вантажного поїзда, становлять $7,99 \text{ м/с}^2$, а при проїзді пасажирського – $6,21 \text{ м/с}^2$. Максимальні значення переміщень вертикального розміру конструкції шляхопроводу отримано при проїзді вантажного поїзда, величиною $1,63 \text{ мм}$, а на бокових горизонтальних сторонах конструкції шляхопроводу – $1,07 \text{ мм}$. При проїзді пасажирського поїзда максимальні значення переміщень вертикального розміру конструкції шляхопроводу склали $1,11 \text{ мм}$, а на бокових сторонах конструкції – $0,80 \text{ мм}$ (табл. 5).

Таблиця 5

Прискорення та переміщення металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу

Тип поїзду	Горизонтальний розмір конструкції		Вертикальний розмір конструкції		Горизонтальний розмір конструкції	
	A1	A4	A2	A5	A3	A6
Пасажирський	0,40/0,41	-	2,36/1,02	-	0,42/0,63	-
Вантажний	0,88/1,07	-	3,77/1,54	-	0,71/0,91	-
Вантажний	2,63/0,57	-	7,99/1,63	-	2,35/0,65	-
Пасажирський	-	1,96/0,39	-	6,21/1,11	-	1,77/0,80

Примітки до табл. 5: у чисельнику наведено значення прискорень, у знаменнику – переміщень

Отже, величини відносних деформацій вертикального та горизонтального розмірів металевої гофрованої конструкції шляхопроводу є меншими за 3 %, які регламентуються нормами, тому це дає змогу зробити висновок, що несуча здатність шляхопроводу із МГК забезпечена.

Економічний ефект від впровадження запропонованого інерційного методу моніторингу технічного стану транспортних споруд із МГК досягається внаслідок скорочення витрат праці на проведення візуальних оглядів споруд та дорогого вимірювального обладнання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема розробки методів оцінювання і підвищення несучої здатності транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій при дії статичних і динамічних навантажень від транспортних засобів та температурних кліматичних впливів навколишнього середовища. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації полягають у наступному:

1. За розробленою аналітичною моделлю оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд встановлено, що умова зародження залишкових деформацій, яка має місце у склепінні труби під залізничною колією, виконується тільки при умові одночасного несприятливого впливу двох факторів (причин): допущення розвитку нерівності колії за межі допустимих значень без виконання заходів щодо її усунення чи обмеження швидкості руху транспортних одиниць (перша причина); зниження ступеня ущільнення ґрунтової засипки (друга причина). При відсутності однієї з причин зародження залишкових деформацій металевої гофрованої труби не відбудеться. У спільному впливі обидвох причин переважаюче значення має перша причина, частка впливу якої становить 75 %, а частка другої причини – 25 %.

2. При проєктному ущільненні ґрунтової засипки рівному 97 % критерій міцності та відносні вертикальні деформації металевої гофрованої труби забезпечуються навіть при товщині металу 3 мм. Встановлено, що несуча здатність труби, яка виконана із гофрованих конструкцій типу Multiplate MP150 при товщині гофрованого листа 6 мм із розміром хвиль гофрів 150x50 мм та 380x140 мм, забезпечується у випадку ущільнення ґрунтової засипки від 90 % до 97 %. Проте міцність труби, яка виготовлена із гофрованих листів розміром 200x55 мм при ступені ущільнення ґрунтової засипки 90 %, не забезпечується, що пов'язано із розвитком напружень величиною 256,76 МПа, які перевищують допустимі.

3. Проведені дослідження напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій методом скінченних елементів показують, що навіть при наднормативній нерівності може забезпечуватися стійка робота споруд у випадку, якщо ґрунтова засипка має достатній ступінь ущільнення. Згідно з даними розрахунками, запас міцності споруд із МГК становить від 45 до 34 % – залежно від ступеня ущільнення ґрунтової засипки. Для виникнення пластичних незворотних деформацій металевих гофрованих конструкцій зовнішнє навантаження більше ніж у 2,48 рази повинно перевищити проєктні навантаження.

4. За результатами проведених експериментальних досліджень транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій на дію статичних та динамічних навантажень, за допомогою удосконаленого пристрою, встановлено:

- при статичних експериментальних випробуваннях труби із МГК локомотивом ЧМЭ 3 з'ясовано, що вертикальна відносна деформація (прогин) у середній частині труби становить 2,05 мм, а максимальні напруження у верхній точках труби – 8,95 МПа;

- при динамічних експериментальних випробуваннях труби із МГК зафіксовано, що вертикальна відносна деформація труби при проходженні вантажного поїзда із тяговим рухомим складом ЧМЭ 3 становить 2,74 мм, а горизонтальна – 0,77 мм. Максимальні напруження при дії динамічного навантаження у верхній частині труби становили 10,7 МПа. Отже, метал труби працює у пружній стадії при проектному стані колії та нормативному ущільненні ґрунтової засипки;

- при статичних експериментальних випробуваннях шляхопроводу із МГК на км 228+160 автомобільної дороги Київ–Харків–Довжанський встановлено, що максимальний прогин вертикального діаметру конструкції становив 1,65 мм при завантаженні шляхопроводу на 81 % від нормативного навантаження НК100.

Напруження та прогини визначені експериментально, знаходяться в інтервалі 3–11 % від розрахованих теоретично (аналітичний та числовий розрахунки), що свідчить про правильність прийнятих у розрахунках передумов. Тому удосконалена аналітична методика оцінювання несучої здатності споруд із МГК великого поперечного перерізу та алгоритм скінченно-елементного моделювання таких споруд рекомендуються для подальшого практичного застосування з метою оцінки несучої здатності споруд із МГК.

5. За допомогою розроблених пристроїв інерційних вимірювань проведено дослідження ущільнення ґрунтової засипки у лабораторних умовах та в умовах будівництва споруди із МГК. Результати показали значну зміну ущільнення щебеневої та щебенево-піщаної засипок у процесі їх деформації. Досягнуте максимальне ущільнення засипки у чотири рази вище, ніж у початковому неущільненому стані. Тобто параметр ущільнення, який базується на непрямих визначеннях ступеню ущільнення, має набагато кращий коефіцієнт детермінації, ніж методи, які базуються на оцінці зменшення об'єму чи зменшення пор у ґрунтовій засипці. Тому запропоновані підходи оцінки ступеню ущільнення ґрунтової засипки за швидкістю поширення пружних хвиль мають практичне значення для оцінки якості ущільнення ґрунтової засипки при будівництві споруд із МГК, несуча здатність яких безпосередньо залежить від якості ущільнення ґрунтової засипки.

6. Проведені експериментальні дослідження розподілу температури на поверхнях металевих гофрованих листів конструкції показали нерівномірний розподіл температур. Різниця температур між нижньою та верхньою поверхнями листа становить +7,1°C – при максимальних додатних температурах навколишнього середовища та -5,5°C – при мінімальних від'ємних температурах. Тому при розрахунку таких конструкцій необхідно враховувати нерівномірний розподіл температури на поверхні гофрованих листів конструкції.

7. Напруження, спричинені кліматичними температурними перепадами навколишнього середовища, досягають максимальних значень у випадку обмеження

переміщень гофрованого листа конструкції на торцях. Величина напружень при заданих умовах закріплення становить: 5,26 МПа – при виміряних максимальних додатних температурах влітку і 6,55 МПа – при виміряних мінімальних значеннях температур взимку. Величина напружень, які виникають у спорудах із МГК від кліматичних температурних перепадів навколишнього середовища, становить до 10 % від допустимих напружень.

8. Результати оцінки термопружного стану відремонтованої залізобетонної труби металевою гофрованою конструкцією («методом гільзування») показали, що на межі металевої і бетонної оболонок виникає стрибок температурних напружень. Радіальні напруження, які виникають при максимальних значеннях температури, становлять 0,23 МПа, а при мінімальних – 0,18 МПа; відповідні осьові напруження становлять 101,0 МПа та 78,0 МПа, а відповідні кільцеві напруження – 39,0 МПа та 28,0 МПа. Тобто визначальними є осьові напруження, рівень яких становить до 40 % від значень допустимих напружень.

9. Для відновлення несучої здатності пошкоджених транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій рекомендується використовувати додаткові конструктивні елементи, а саме: установка додаткових круглих ребер жорсткості, або підсилюючих пластин, вигнутих за формою гофрованого листа, у пазухи гофрованого профілю та проведення подвійного гофрування у місцях споруди із МГК, де діють найбільші сили від транспортних засобів. Доведено, що запропоновані конструктивні варіанти відновлюють несучу здатність пошкоджених металевих гофрованих конструкцій.

10. На основі проведених експериментальних досліджень споруд із МГК за допомогою розробленої інерційної системи моніторингу технічного стану встановлено, що максимальні значення переміщень вертикального розміру конструкції шляхопроводу отримано при проїзді вантажного поїзда і вони становлять 1,63 мм, а горизонтального розміру конструкції – 1,07 мм, при проїзді пасажирського поїзду переміщення відповідно склали 1,11 мм та 0,80 мм. При цьому відносні деформації вертикального розміру конструкції шляхопроводу є меншими за допустиму нормативну величину 3 %.

Встановлено, що індикатором зміни технічного стану транспортних споруд із МГК є величина прискорень, яка виникає у вершині споруди. Тому для забезпечення несучої здатності та довговічності споруд із МГК рекомендується на початковому етапі експлуатації здійснювати контроль змін несучої здатності споруди із МГК розробленою інерційною системою.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

у монографіях:

1. Лучко Й. Й. Вимірювання напружено-деформованого стану конструкцій мостів при змінних температурах і навантаженнях: Монографія / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук. – Львів: Каменяр, 2012. – 235 с.

2. Лучко Й. Й. Мости і труби з гофрованих металевих конструкцій та моніторинг ґрунтових основ доріг і споруд: Монографія / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, І. Б. Кравець. – Львів: Світ, 2019. – 260 с.

Статті у наукових фахових виданнях України

3. Ковальчук В. В. Основні засади розрахунку металевих гофрованих конструкцій методом скінченних елементів при взаємодії з ґрунтовою засипкою // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2014. – Вип. № 56. – С. 94–102.

4. Стасюк Б. М. Дослідження напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при взаємодії з ґрунтом засипки / Б. М. Стасюк, В. З. Станкевич, В. В. Ковальчук, Й. Й. Лучко // Збірник наук. праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. транспорту ім. академ. В. Лазаряна «Мости та тунелі: Теорія, дослідження, практика». – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 5. – С. 105–111.

5. Ковальчук В. В. Дослідження температурного поля та напруженого стану металевих гофрованих труб // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне, 2014. – № 29. – С. 186–192.

6. Ковальчук В. В. Дослідження ефективності застосування геотекстилю в конструкції залізничної колії / В. В. Ковальчук, О. М. Баль, Б. В. Костик // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – Харків, 2014. – Вип. 148 (2) – С. 164–170.

7. Ковальчук В. В. Скінченно-елементний розрахунок напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із ґрунтом засипки у програмному середовищі NX NASTRAN // Вісник Львівського національного аграрного університету. – Львів, 2015. – № 16. – С. 19–25.

8. Ковальчук В. В. Перспективи застосування металевих гофрованих конструкцій на залізничних та автомобільних дорогах України / Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України». – Київ, 2015. – № 2 (111). – С. 32–37.

9. Ковальчук В. В. Характер зміни величини тиску на вершину металевої гофрованої труби у залежності від висоти засипки над нею при дії рухомого складу залізниць // Збір. наук. праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». – Рівне, 2015. – № 30. – С. 441–447.

10. Ковальчук В. В. Вплив товщини гофрованого елемента на напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. транспорту ім. академ. В. Лазаряна «Наука та прогрес транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 3 (57). – С. 199–207. doi: <http://dx.doi.org/10.15802/stp2015/46079>.

11. Ковальчук В. В. Напружено-деформований стан залізобетонних труб, підсилених металевою гофрованою трубою, при взаємодії із ґрунтовою засипкою // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2015. – Вип. 58. – С. 176–185.

12. Лучко Й. Й. Дослідження несучої здатності металевої гофрованої конструкції за критерієм розвитку пластичного шарніру / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, О. С. Набоченко // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. транспорту ім. академ. В. Лазаряна «Наука та прогрес транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 5 (59). – С. 180–194.

13. Лучко И. И. Техническая диагностика транспортных сооружений при изменяющихся нагрузках и температурах / И. И. Лучко, В. В. Ковальчук, О. М. Возняк // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2015. – № 4. – С. 42–48.

14. Luchko Josef. Methods of assessing the bearing capacity of corrugated metal structures / Josef Luchko, Vitalii Kovalchuk // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2016. – № 3(83). – С. 79–90.

15. Kovalchuk V. Research and analysis of the stressed-strained state of metal corrugated structures of railroad tracks / V. Kovalchuk, J. Luchko, I. Bondarenko, R. Markul, B. Parneta // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov – 6/7 (84), 2016. – P. 4–10. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.84236> (*індексується наукометричною базою Scopus*).

16. Лучко Й. Й. Напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із ґрунтом засипки / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, Ю. Є. Ковальчук // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. – № 877. – С. 131–136.

17. Kovalchuk V. The study of strength of corrugated metal structures of railroad tracks / V. Kovalchuk, R. Markul, O. Bal, A. Milyanych, A. Pentsak, B. Parneta, O. Gajda // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov. – 2/7 (86), 2017. – P. 18–25. doi:10.15587/1729-4061.2017.96549 (*індексується наукометричною базою Scopus*).

18. Kovalchuk V. Study of the stressstrain state in defective railway reinforcedconcrete pipes restored with corrugated metal structures / V. Kovalchuk, R. Markul, A. Pentsak, B. Parneta, O. Gajda, S. Braichenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov. – 5/1 (89), 2017. – P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109611 (*індексується наукометричною базою Scopus*).

19. Kovalchuk Vitalii. Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type multiplate mp 150 During interaction with backfill soil / Vitalii Kovalchuk, Yuri Kovalchuk, Mykola Sysyn, Volodymyr Stankevych, Oleksiy Petrenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov. – 1/1 (91), 2018. – P. 18–26. doi: 10.15587/1729-4061.2018.123002 (*індексується наукометричною базою Scopus*).

20. Luchko Josef. Investigation of influence of the metal corrugated pipe diameter on its stress-strain state / Josef Luchko, Vitalii Kovalchuk, Ivan Kravets // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2018. – № 3 (91). – С. 26–35.

21. Ковальчук В. В. Георадіолокація як неруйнівний метод моніторингу земляного полотна / В. В. Ковальчук, І. Б. Кравець, Й. Й. Лучко // Збір. наук. праць «Дороги і мости». – Київ, 2019. – Вип. 9–20. – С. 117–137.

22. Лучко Й. Й. Експериментальні дослідження розподілу температур на поверхнях транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, І. Б. Кравець, В. С. Джус // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2019. – Вип. № 76. – С. 52–62.

23. Nabochenko O. Studying the railroad track geometry deterioration as a result of an uneven subsidence of the ballast layer / O. Nabochenko, M. Sysyn, V. Kovalchuk, Yu. Kovalchuk, A. Pentsak, S. Braichenko // Eastern-European Journal of Enterprise

Technologies. – Kharkov. – 1/7(97), 2019. – P. 50–59. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154864 (*індексується наукометричною базою Scopus*).

24. Gera B. A study of the effects of climatic temperature changes on the corrugated structure of a culvert of a transportation facility / B. Gera, V. Kovalchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov. – 3/7(99), 2019. – P. 26–35. doi: 10.15587/1729-4061.2019.168260 (*індексуються наукометричною базою Scopus*).

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

25. Sysyn M. P. Die Tragfähigkeit von Eisenbahndurchlässen in Abhängigkeit von der Bauausführung und der Instandhaltung / M. P. Sysyn, W. W. Kowaltschuk, O. S. Nabotschenko, Ulf Gerber // ETR – Eisenbahntechnische Rundschau. – Euralpres, Deutschland. – Wol. 5. – Mai 2016. – S. 39–44.

26. Gerber U. Assessment of the load-carrying capacity of flexible metal culverts with residual deformations on the Ukrainian Railways / U. Gerber, M. P. Sysyn, V. V. Kovalchuk, O. S. Nabochenko // Věda a výzkum pro práce na železniční dopravní cestě, 2016. – S. 188–191.

27. Sysyn M. The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works / M. Sysyn, U. Gerber, V. Kovalchuk, O. Nabochenko // Archives of Transport. – Poland, 47(3), 2018. – P. 91–107. doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.6512> (*індексується наукометричною базою Scopus*).

28. Sysyn Mykola. Modelling and vehicle based measurements of ballast settlements under the common crossing / Mykola Sysyn, Ulf Gerber, Dimitri Gruen, Olga Nabochenko, Vitalii Kovalchuk // European Transport – Transporti Europei. – Issue 71, Paper № 5, 2019. – P. 1–25 (*індексується наукометричною базою Scopus*).

29. Sysyn M. Laboratory evaluation of railway ballast consolidation by the non-destructive testing / M. Sysyn, V. Kovalchuk, U. Gerber, O. Nabochenko, B. Parneta // Communications – Scientific Letters of the University of Zilina. – (2) 21, 2019. – P. 81–88 (*індексується наукометричною базою Scopus*).

30. Sysyn M. Experimental study of railway trackbed pressure distribution under dynamic loading / M. Sysyn, V. Kovalchuk, O. Nabochenko, Yu. Kovalchuk, O. Voznyak // The Baltic journal of road and bridge engineering. – Volume 14, Issue 4, 2019. – P. 504–520 (*індексується наукометричною базою Scopus*).

31. Gerber Ulf. Tragfähigkeit und Geometrie der Eisenbahnschotterbettung / Ulf Gerber, Mykola Petrowytsch Sysyn, Witali Wolodymyrowytsch Kowaltschuk // EIK – Eisenbahningenieur Kalender Jahrbuch für Schienenverkehr&Technik 2019. – S. 1–14. Hamburg: DVV Media Group GmbH / Eurailpress Hamburg. – ISSN 0934-5930, ISBN 978-3-87154-572-6.

у патентах:

32. Патент №93604 МПК G 01 B 5/30, E04B 1/00. Пристрій для вимірювання та оцінки напружено-деформованого стану транспортних споруд при змінних температурах і статичних та динамічних навантаженнях / Ковальчук В. В.; заявник Ковальчук В. В. – № u2014 04271; заяв. 22. 04. 2014 р., опублік. 10. 10. 2014. Бюл. № 19.

33. Патент №94540 МПК G 01 B 5/30. Спосіб визначення напружень у мостових конструкціях та металевих гофрованих трубах, які виникають внаслідок дії змінних температур та навантажень / Лучко Й. Й., Возняк О. М., Ковальчук В. В.; заявник Ковальчук В. В. – № u2014 01808; заяв. 24. 02. 2014 р., опублік. 25. 11. 14. Бюл. № 22.

34. Патент №125410 МПК(2018.01) G01N 17/00 G01N 27/20 G01N 33/42 G01B 5/30. Пристрій для вимірювання та оцінки напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при змінних навантаженнях / Ковальчук Ю. Є., Пелешко І. Д., Ковальчук В. В.; заявник Ковальчук В. В. – № u2017 11754; заяв. 01. 12. 2017 р., опублік. 10. 05. 2018. Бюл. № 9, 2018. – 7 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

35. Kovalchuk V. V. Erweiterung der Verkehrsanlagen durch den Einsatz von Wellblechstrukturen auf Rai und Strassen Ukraine // Матеріали міжнародного технічного семінару «Перспективні технології ремонту земляного полотна та верхньої будови колії». – Львів, 2015. – С. 20–21.

36. Ковальчук В. В. Напружено-деформований стан металевих гофрованих труб типу горизонтальний еліпс при взаємодії із ґрунтом засипки / Матеріали 75-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 274–276.

37. Лучко Й. Й. Застосування металевих гофрованих конструкцій при ремонті дефектних залізобетонних труб на залізничних та автомобільних дорогах України / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук // Актуальні проблеми наукового й освітнього простору в умовах поглиблення євроінтеграційних процесів: збір. тез доп. Міжнародної наук.-практ. конференції. – Мукачево: Карпатська вежа, 2015. – С. 337–340.

38. Лучко Й. Й. Дослідження впливу ґрунтів та розміру типу гофр на напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій типу горизонтальний еліпс / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук // [Тези Міжнародної науково-практичної конференції імені доктора технічних наук Сокола Едуарда Миколайовича «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд»]. – Львів.: ЛФ ДНУЗТ, 2015. – С. 69–71.

39. Лучко Й. Й. Модель оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій залізничної колії / Й. Й. Лучко, О. М. Баль, В. В. Ковальчук, Р. В. Маркуль // Міжнародна наукова конференція «Методика викладання та методи дослідження в математиці» / Закарпатський угорський інститут ім. Ференца Ракоці ІІ. – Берегово, 2016. – С. 77.

40. Ковальчук В. В. Експертні дослідження несучої здатності металевих гофрованих конструкцій залізничної колії / В. В. Ковальчук, М. П. Сисин, О. С. Набоченко, Ульф Гербер // Проблемы механики железнодорожного транспорта: Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение: XIV Международная конференция: Тезисы докладов. – Днепропетровск.: Вид. ДНУЗТ, 2016. – С. 63–64.

41. Лучко Й. Й. Неруйнівний контроль напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій залізничної колії / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, Ю. Є. Ковальчук // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування: Праці V Міжнародної науково-технічної

конференції (Тернопіль, 19–22 вересня 2017 р.) – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. – С. 246–248.

42. Пелешко І. Д. Дослідження впливу типу гофр на напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій / І. Д. Пелешко, Ю. Є. Ковальчук, В. В. Ковальчук / 5-та Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки». – Одеса, 2018. – С. 117–121.

43. Ковальчук В. В. Дослідження впливу ступеню ущільнення ґрунтової засипки на несучу здатність транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій / Матеріали 79-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпро, 2019. – С. 260–261.

44. Ковальчук В. В. Оцінка несучої здатності транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах експлуатаційних навантажень / В. В. Ковальчук, Й. Й. Лучко // Науково-практичний семінар «Актуальні проблеми ремонтів та утримання мостів». – Одеса: ДП «ДерждорНДІ», 2019. – С. 55.

45. Лучко Й. Й. Термопружний стан транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій при дії змінних температур навколишнього середовища / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук // Науково-практичний семінар «Актуальні проблеми ремонтів та утримання мостів». – Одеса: ДП «ДерждорНДІ», 2019. – С. 69.

46. Ковальчук В. В. Несуча здатність транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах експлуатації / В. В. Ковальчук, Й. Й. Лучко // III Міжнародна конференція «Експлуатація та реконструкція будівель та споруд». – Одеса, ОДАБА, 2019. – С. 75.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

47. Kovalchuk Vitalii. Stability of the Railway Subgrade under Condition of Its Elements Damage and Severe Environment / Vitalii Kovalchuk, Mykola Sysyn, Olga Nabochenko, Andrii Pentsak, Oleh Voznyak and Stepan Kinter // MATEC Web of Conferences 2nd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2019) Lviv, Ukraine, September 19-20. – Vol. 294. – 2019. – 10 p. (*індексується наукометричною базою Web of Science*).

48. Sysyn Mykola. Evaluation of railway ballast layer consolidation after maintenance works / Mykola Sysyn, Olga Nabochenko, Vitalii Kovalchuk, Ulf Gerber // Acta Polytechnica. Journal of Advanced Engineering. – Czech Technical University in Prague. – Vol. 59, No 1 (2019). – p. 77–87. doi: 10.14311/AP.2019.59.0077 (*індексується наукометричною базою Scopus*).

АНОТАЦІЯ

Ковальчук В. В. Несуча здатність транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах експлуатації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди (19 – архітектура та будівництво). – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса. – 2019.

Дисертація присвячена розв'язанню актуальної науково-практичної проблеми – розробці методів визначення та підвищення несучої здатності транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій, які перебувають в умовах експлуатації. Розроблено аналітичну методику оцінювання несучої здатності транспортних споруд із МГК. Побудовано алгоритм скінченно-елементного моделювання для оцінки несучої здатності транспортних споруд із МГК великого поперечного перерізу. Розроблено методи для оцінки ступеня ущільнення ґрунтової засипки при спорудженні транспортних споруд із МГК. Удосконалено математичні моделі для розрахунку теплопровідності та термопружного стану металевої гофрованої оболонки. Запропоновано конструктивні варіанти відновлення несучої здатності транспортних споруд із МГК. Розроблено інерційну систему моніторингу технічного стану транспортних споруд із МГК.

Ключові слова: несуча здатність, транспортна споруда, металева гофрована конструкція, шляхопровід, труба, ґрунтова засипка, статичні навантаження, динамічні навантаження, теорія пружності, пружні хвилі, термопружний стан, моніторинг, інерційна система.

АННОТАЦИЯ

Ковальчук В. В. Несущая способность транспортных сооружений из металлических гофрированных конструкций в условиях эксплуатации. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения (19 – архитектура и строительство). – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепр. – Одесская государственная академия строительства и архитектуры – Одесса, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической проблемы разработке методов определения и повышение несущей способности транспортных сооружений из металлических гофрированных конструкций, находящихся в условиях эксплуатации. Разработана аналитическая методика оценки несущей способности транспортных сооружений из МГК. Построен алгоритм конечно-элементного моделирования для оценки несущей способности транспортных сооружений из МГК большого поперечного сечения. Разработаны методы для оценки степени уплотнения ґрунтовой засыпки при строительстве транспортных сооружений из МГК. Усовершенствованы математические модели для расчета теплопроводности и термоупругого состояния металлической гофрированной оболочки. Предложены конструктивные варианты повышения несущей способности транспортных сооружений из МГК. Разработано инерционную систему мониторинга технического состояния транспортных сооружений из МГК.

Ключевые слова: несущая способность, транспортное сооружение, металлическая гофрированная конструкция, путепровод, труба, ґрунтовая засыпка, статические нагрузки, динамические нагрузки, теория упругости, упругие волны, термоупругое состояние, мониторинг, инерционная система.

ABSTRACT

Kovalchuk V. V. Carrying capacity of transport constructions made of corrugated metal structures under operating conditions. – Manuscript.

Dissertation for the Doctor of Science Degree on specialty 05.23.01 – building constructions, buildings and structures (19 – Architecture and Construction). – Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro. – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture – Odessa, 2019.

Dissertation is devoted to the solution of the problem of estimation methods development and the increase of bearing capacity of transport constructions made of metal corrugated structures (MCS), which are exposed to operational loads from vehicles and climatic temperature influences of the environment. The theoretical component of the problem is solved by improving the analytical methods of assessing the load-bearing capacity of constructions made of MCS with large cross-sectional area (more than 6 m) in soil environment at the limit load from vehicles and the effects of variable environmental climatic influences which are taken into consideration during structure design. The experimental component is solved by improving the device and refining the algorithm for determining the stress-strain state of metal corrugated structures; development of the device intended to control the degree of the subgrade consolidation during building the constructions made of corrugated metal structures; development of the inertial system of monitoring the technical state of constructions during the initial period of operation with increased dynamic action of vehicles conditioned by uneven subsidence of soil consolidating backfill of constructions made of metal corrugated structures.

The scientific and technical literature review according to dissertation theme has been carried out, as a result of which the necessity to develop methods for determining bearing capacity of constructions and its increase that are made of metal corrugated structures has been established.

The analytical method of estimation of load-bearing capacity of transport constructions made of metal corrugated structures has been developed, which allows to estimate the stress-deformed state of MCS and the magnitude of plastic hinge coefficient in the arch of constructions made of metal corrugated structures, taking into account a number of factors: the level of consolidation of soil backfill, the level of dynamic loading from transport means and various physical-mechanical and geometrical parameters of the soil backfill and the metal corrugated structure.

The algorithm of a finite element modeling for estimation of load-bearing capacity of transport constructions of metal corrugated structures with large cross-section has been developed. Based on this algorithm, the calculation of constructions with MCS was performed and it was found that the direct cause of residual (plastic) deformation of metal corrugated structures is the increase of stresses in metal sheets to maximum permissible values due to insufficient degree of soil backfill compaction and the dynamic action from transport means. In addition, it has been established that even in the case of abnormal unevenness of the subgrade, stable operation of the construction can be ensured if the soil backfill has a normative degree of compaction.

The device has been improved and the algorithm for carrying out experimental studies of the stress-deformed state of metal corrugated structures under static and dynamic loads from vehicles has been refined. Experimental studies of the stress-strain

state of culverts and overpasses made of metal corrugated structures with the diameter of more than 6 m under the influence of static and dynamic loads of vehicles have been carried out. As a result, the dependences of the stress-strain state of metal corrugated structures under the influence of multifactorial operational effects have been obtained.

The method of soil backfill compaction assessment has been developed, which allows to increase the accuracy of spatial backfill compaction determination when constructing transport structures of corrugated metal structures. This is the basis for further research with the use of modern sensor and microcontroller technologies to create autonomous monitoring systems of transport structures technical state.

Long-term experimental studies of temperature distribution on the surfaces of metal corrugated sheets of a transport construction depending on the climatic temperature differences of the environment have been carried out, and mathematical models have been improved to calculate the thermal conductivity and thermal-elastic state of a metal corrugated cover of a transport construction under irregular temperature distribution on the surfaces of corrugated structures.

Design variants of bearing capacity increase and durability of transport constructions made of metal corrugated structures are offered. It has been found that the most advantageous feasible options for increasing the load-bearing capacity and, accordingly, improving the state of traffic safety, is to establish the structural variant with the use of stiffeners in the form of a curved plate replicating the form of a corrugated sheet of the structure, or the installation of a round stiffness rib in a concave part of a corrugated metal sheet of the construction.

Recommendations on the use of corrugated metal structures during the overhaul of defective reinforced concrete culverts or small bridges have been developed, which will allow not to discontinue railway and road transport traffic, carry out renewable works in a short period of time, practically without changing operational conditions of transport facilities and save repair expenditures.

The inertial system for monitoring technical state of transport facilities with MCS has been developed. It has been established that timely decision-making regarding optimal periods of restorative or preventive works performance on the basis of assessment of the change in the technical state of metal corrugated structures during a long period of operation using the developed system of diagnostics and continuous monitoring allows to increase the service life of transport structures. This enables you to make immediate decisions as for the performance of a certain type of repair works of transport corrugated metal structures, which have a direct impact on the load-bearing capacity increase, and consequently, the reduction of operating costs, as well as the improvement of safety traffic.

It has been proved that the indicator of the change in the technical state of constructions with metal corrugated structures is the magnitude of accelerations at the top of the structure, which occur during vehicles passage. Therefore, in order to ensure the load-bearing capacity and durability of transport constructions made of corrugated metal structures, it is recommended to monitor changes in the technical state of structures at the initial stage of operation with the help of the developed inertial system.

Keywords: load carrying capacity, transport construction, corrugated metal structure, overpass, pipe, soil backfill, static loads, dynamic loads, elasticity theory, elastic waves, thermal state, monitoring, inertial system.

Надруковано згідно з оригіналом автора

Підписано до друку 10. 02. 2020.
Формат 60х84 1/16. Папір офсетн. Гарнітура Times.
Офсетний друк. Умов. друк. арк. 1,9.
Тираж 120 прим.

Видавництво «Каменяр». 79008, Львів, Підвальна, 3.
Свідоцтво Держ. реєстру: серія ДК, № 462.
Тел./факс: (032)235-59-49; ел. адреса: vyd@kamenyar.com.ua