

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Збірник наукових праць

Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Випуск 10

2016

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

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

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

За загальною редакцією проф. О. М. ПШІНЬКА

Засновано у 2011 році

Випуск 10



Дніпропетровськ
2016

УДК 624.21 + 624.19(066)

ББК 39.112

Д 54

ЗАСНОВНИК ТА ВИДАВЕЦЬ:

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

*Затверджено до друку рішенням Вченої ради Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна від 26.12.2016 р., протокол № 10*

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

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

Редакційна колегія:

головний редактор – доктор технічних наук *В. Д. Петренко*
заступник головного редактора – доктор технічних наук *Д. О. Банников*
відповідальний секретар – кандидат технічних наук *В. І. Соломка*

Члени редакційної колегії:

доктори технічних наук *М. І. Казакевич, О. Л. Тютькін, М. І. Нетеса, Й. Й. Лучко,
А. В. Радкевич, А. І. Лантух-Лященко, В. В. Кулябко, А. А. Плугін, З. Я. Бліхарський,
Л. М. Тимофіїва, Р. О. Гейзен, Войцех Франус*

Д 54 **Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика** : Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 10. – Дніпропетровськ, 2016. – 125 с.
ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print)

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

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

УДК 624.21 + 624.19(066)

ББК 39.112

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

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

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

© Дніпропетр. нац. ун-т залізн.
трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2016

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

ЗМІСТ

О. О. ДАВИДЕНКО СТАТИСТИЧНИЙ ПРОГНОЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОДОРОЖНИХ МОСТІВ УКРАЇНИ	4
В. С. ДОРОФЄЄВ, В. М. КАРПЮК, К. І. АЛБУ, Ю. А. СЬОМІНА МІЦНІСТЬ ТА ТРИЩИНОВАСТІВІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДІЇ МАЛОЦИКЛОВИХ ЗНАКОПОСТІЙНИХ І ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВИСОКИХ РІВНІВ	13
Ю. П. КИТОВ, Г. Л. ВАТУЛЯ, М. А. ВЕРЕВИЧЕВА, С. В. ДЕРИЗЕМЛЯ РАЦИОНАЛИЗАЦІЯ СЕЧЕНИЙ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННИХ БАЛОК	27
П. М. КОВАЛЬ, О. Я. ГРИМАК ВПЛИВ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОБОТУ БЕТОННИХ БАЛОК, АРМОВАНИХ БАЗАЛТОПЛАСТИКОВОЮ АРМАТУРОЮ	35
М. П. КОВАЛЬ ЕФЕКТИВНІСТЬ ОПОРНОГО АНКЕРУВАННЯ БОЛТОВИМИ З'ЄДНАННЯМИ СТАЛЕВОГО ПРОФІЛЬОВАНОГО НАСТИЛУ У МОНОЛІТНИХ ПЛИТАХ	43
А. И. ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО ПРОБЛЕМА НОРМАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ МОСТОВ	51
Й. Й. ЛУЧКО, Б. Л. НАЗАРЕВИЧ, І. Б. КРАВЕЦЬ ВІДНОВЛЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ПОШКОДЖЕНИХ КОРОЗІЄЮ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНОГО ВУЗЛА ПІДЇЗДНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ШЛЯХУ	61
К. В. МЕДВЕДЕВ, В. А. ТЕМИРГАЛИЕВ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОСТОВ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА	70
О. І. МЕНЕЙЛЮК, А. Ф. ПЕТРОВСЬКИЙ, О. О. БОРИСОВ, І. М. БАБІЙ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ РОЗЧИНУ ДЛЯ ІН'ЄКЦІЇ ПІСЧАНОГО ҐРУНТУ	80
А. В. МУРАШКО, В. С. ДОРОФЕЕВ РЕГУЛЯРНІСТЬ КОНСТРУКТИВНОЇ СХЕМИ ПРИ ОЦЕНКЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ОПОР ТРУБОПРОВОДОВ	86
П. М. САЛАМАХИН К ВОПРОСУ ЭКОНОМИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ И ДЕНЕЖНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ ВСЕГО МИРА	92
А. І. ЮХИМЕНКО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТВОРЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ АРМОЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ УКРІПЛЕННЯ ҐРУНТІВ ОСНОВ СПОРУД ЗА БУРОЗМІШУВАЛЬНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ	98
Ф. В. ЯЦКО МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЗГІНАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ПРОЕКТУВАННІ	107
A. MENEYLUYK, A. NIKIFOROV MULTIDIMENSIONALITY OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL MANAGEMENT OF TRANSPORT FACILITIES CONSTRUCTION ENTERPRISE	115

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21:625.745.12-047.72(477)

О. О. ДАВИДЕНКО*

* Кафедра «Мости і тунелі», Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, Київ, Україна, 01010
тел. +38 (050) 471 33 99, ел. пошта aleksandros.davydenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-0176-3256

СТАТИСТИЧНИЙ ПРОГНОЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ УКРАЇНИ

Мета. Надати статистичну модель прогнозу довговічності автодорожніх мостів України. **Методика.** Теоретичне дослідження. **Результати.** Розроблено модель прогнозу довговічності на основі статистичного аналізу даних технічного стану залізобетонних автодорожніх мостів. **Наукова новизна.** Вперше виконано статистичний аналіз довговічності автодорожніх мостів, що знаходяться в експлуатації. **Практичне значимість.** Отримані результати являються практичним інструментом управління надійністю і ресурсом залізобетонних автодорожніх мостів.

Ключові слова: автодорожні мости; довговічність; життєвий цикл; залишковий ресурс

Вступ

Стаття присвячена проблемі прогнозу технічного стану автодорожніх мостів України. Сьогодні 1873 одиниці залізобетонних мостів, які були обстежені і занесені в базу АЕСУМ, потребують негайного ремонту для подальшої безпечної експлуатації. База АЕСУМ налічує актуальні дані лише для 6919 одиниць залізобетонних мостів, з 16187 одиниць мостів підпорядкованих УкрАвтодору. Приблизно для 9268 одиниць мостів технічний стан невизначений і кількість мостів, що потребують термінового ремонту значно більша ніж 1873 одиниць. Причиною незадовільного стану дорожньої мережі є фактори: недостатнє фінансування, відсутність незалежного контролю якості будівництва, непрофесійна робота служби експлуатації та ін.

Результатом є одне із останніх місць в Європі в розвитку дорожньої мережі. Так, наприклад, показник кількості доріг з твердим покриттям на 1000 жителів у Франції складає 14,2 км, в Україні – 3,2 км. В цих умовах мости виявляються найбільш слабкою ланкою транспортного ланцюга. Реконструкція або капітальний ремонт моста паралізує відносно велику частку транспортної мережі, порушує товарообіг з Європою, значно впливає на економіку, як правило, великого за площею прилеглого регіону. Сьогодні автодорожні мости мають бути предметом особливої уваги як потенційне джерело економічної і соціальної небезпеки.

Вважається, що довговічність залізобетонних мостів, запроектованих відповідно чинних нормативних вимог, має складати, в залежності від типу прогонової будови, не менше 70-100 років. В дійсності, приходиться констатувати, що середній термін служби залізобетонних прогонових будов мостів України не перевищує 47-50 років. Поряд з цим, слід наголосити, що 10-12 років тому галузь транспортного будівництва мала застарілу нормативну базу, яка за своїм теоретичним базисом суттєво відставала від європейської. Державних будівельних норм з експлуатації транспортних споруд в Україні раніше не було взагалі. Були відомчі інструкції, які не могли в нових умовах задовольнити потреб галузі. Останнім часом положення докорінно змінилося. Станом на початок 2010 р. науковці кафедри «Мости і тунелі» Національного транспортного університету, Державного дорожнього науково-дослідного інституту ім. М. Шульгіна, Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України склали повну нормативну [2, 6, 7, 8] і методичну [11, 12, 17, 18, 19] базу системи експлуатації мостів, яка ґрунтується на новітніх наукових засадах [1, 4, 5].

Мета дослідження

Глобальною метою є розробка статистичної моделі прогнозу довговічності автодорожніх мостів України. Ставиться завдання виконати статистичний аналіз технічного стану автодо-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

рожніх залізобетонних мостів України, що послужить базою практичної моделі прогнозу технічного стану.

Існуючі моделі прогнозу ресурсу елементів мостів

Центральною науковою проблемою системи експлуатації мостів є проблема оцінки та прогнозу технічного стану залишкового ресурсу мостів, яка стала особливо актуальною в останні 20 років. Чинні до 2002 року будівельні норми України не надавали ні методології оцінки залишкового ресурсу ні критеріїв оцінки технічного стану мостів, що знаходяться в експлуатації.

Сьогодні, вперше на теренах країн СНД, ми маємо пакет нормативних документів з оціню-

вання і прогнозування технічного стану мостів. Головне місце в системі експлуатації займає документ ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [12], початком становлення якого було надання чинності в 2002 р. відомчому нормативному документу ВБН В.3.1-218-174-2002 «Оцінка технічного стану автодорожніх мостів, що експлуатуються» [2]. Теоретичною базою нормативного документу є новітня модель оцінки та прогнозу залишкового ресурсу елементів мостів, сформульована в роботах [13, 14, 15, 16].

В рамках дослідження нами запропонована така класифікація моделей прогнозу технічного стану елементів мостів (рис. 1).



Рис. 1. Класифікація моделей прогнозу довговічності залізобетонних елементів автодорожніх мостів

Детерміністичні моделі [20, 21] – найбільш прості для прогнозування технічного стану елементів мостів. Ці моделі засновані на статистичній, як правило, нелінійній регресії аналізу даних для визначення швидкості зносу. Інший підхід розбудови детерміністичної моделі базується на фізико-механічних аспектах деградації матеріалів під дією зовнішніх навантажень та впливів оточуючого середовища.

Найбільш поширеним описом процесів деградації бетону є описування рівняннями аналітичної теорії дифузії Адольфа Фіка (1855 р.).

Процес карбонізації описується одномірним диференціальним рівнянням першого закону Фіка:

$$Q = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (1)$$

де Q – кількість перенесеної в результаті дифузії речовини (в даному випадку вуглецю), так звана, щільність дифузійного потоку; $C = C(x, t)$ – концентрація речовини, що дифундує, функція координати x і часу t ; D – коефіцієнт дифузії газу в бетоні, $\text{см}^2/\text{с}$.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Процес дифузії хлоридів описується моделлю другого закону Фіка [22]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (2)$$

де $C = C(x, t)$ – концентрація іонів хлориду на глибині x в часу t , кг/см³; D – коефіцієнт дифузії хлоридів в бетоні, см²/с; t – час, с (рахується від початку експлуатації); x – координата нормальна до поверхні бетону, см.

У будівельній механіці, з 50-х років минулого століття, панувала модель накопичення пошкоджень відома під назвою «теорія лінійного підсумовування пошкоджень Пальмгрена-Майнера», в якій використовується принцип лінійної суперпозиції [23]:

$$\sum_0^n \frac{N_t}{N(\sigma)} = D_i, \quad (3)$$

де D_i – міра пошкоджень; N_t – число циклів навантаження; $N(\sigma)$ – число циклів до руйнування при режимі напруги σ ; n – число ступенів змін режиму вантаження.

Очевидно, що для використання моделі (3) необхідно мати достовірну оцінку кількості циклів навантаження, тобто для прогнозу ресурсу в процесі експлуатації необхідно мати повні дані історії вантаження. Стосовно залізобетонних елементів автодорожніх мостів необхідні початкові дані визначаються настільки приблизно, що втрачається достовірність моделі.

Комбіновані моделі [3] побудовані на засадах фізики деградації залізобетону в сполученні з ймовірнісними аспектами процесу.

Стохастичні моделі [5, 15, 24] представляють процес погіршення технічного стану елементів моста з плином часу, як один або більше розв'язань випадкової функції надійності, як ймовірність досягнення граничного стану за час t має вид:

$$P(t) = \text{Prob}[\min g(X(\tau), \tau) < 0 \text{ для } 0 < \tau < t], \quad (4)$$

або в термінах функції граничного стану

$$P(t) = \text{Prob}[R(X, t) - Q(X, t) < 0], \quad (5)$$

де $R(X, t)$ – узагальнений опір елемента; $Q(X, t)$ – узагальнений навантажувальний ефект; X – вектор базових змінних; t – змінна часу.

Таким чином, залежностями (4), (5) довговічність формулюється як поняття функціонально зв'язане з надійністю. Максимальне значення t , що задовольняє залежностями (1.2), (1.3) і є довговічність T .

Серед стохастичних моделей прогнозу особливе місце займають моделі що базуються на теорії марковських випадкових процесів. Такі моделі набули широкого використання в управлінні проектами, будівництві, військовій справі, економіці, соціології, екології та ін.

Поширеними критеріями класифікації марковських випадкових процесів, що застосовуються в прогнозуванні технічного стану будівельних конструкцій є тип області визначення аргументу T і тип простору станів S . Звичайно розрізняють 4 основних класи марковських випадкових процесів: ланцюг Маркова; марковські послідовності; дискретні марковські процеси; неперервні марковські процеси.

Класи марковських процесів [9] представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Класифікація марковських процесів

Область T	Область S	
	Дискретна	Неперервна
Дискретна	Ланцюг Маркова	Марковська послідовність
Неперервна	Дискретний марковський процес	Неперервний марковський процес

Результатом прогнозу залишкового ресурсу мостів, незалежно від типу моделі, може бути оцінка, що виражена в одиницях часу (роки) або в безрозмірних параметрах (швидкість деградації, характеристика безпеки та ін.).

Аналіз технічного стану автодорожніх мостів України станом на 01.01.2016

Тут представлено дані технічного стану отриманні з вибірки 2016 року – 6919 одиниць. За статистикою на 01.01.2013 в Україні є 16187 одиниць (загальною довжиною 384,3 км) автодорожніх мостів підпорядкованих Укравтодору. Розподіл мостів по станам в залежності від типу конструкції наведено в табл. 2.

Сьогодні констатується суттєве погіршення стану автодорожньої мережі України в цілому, особливо мостів. Кількість мостів, що потре-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

бують ремонту збільшується загрозливими темпами, так на 01.01.2016 1873 одиниць залізобетонних мостів потребують ремонту сьогодні. Потребують ремонту додатково також значна кількість мостів серед тих, які не обстежувались протягом останніх 10 років (9268 одиниць) і не були занесені в базу АЕСУМ, технічний стан яких практично невідомий.

Таблиця 2

Розподіл мостів за станом в залежності від типу конструкції

Тип моста	Експлуатаційний стан				
	2	3	4	5	Разом
Монолітні, од.	57	591	301	21	970
Збірно-монолітні, од.	68	199	69	3	339
Збірні, од.	586	3179	1124	63	4952
Немає даних про тип конструкції, од.	47	319	257	35	658
Всі типи, од.	758	4288	1751	122	6919

Для варіаційного ряду статистичних даних термінів служби автодорожніх залізобетонних мостів обчислено статистичні оцінки (табл. 3): середнє значення варіант (6) та середнє квадратичне відхилення (7).

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i n_i, \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i^2 n_i, \quad (7)$$

де x_i – термін служби i -ого мосту, роки;
 n – кількість мостів вибірки, од.

Привертає увагу той факт, що при середньому термін служби в 47 років середнє квадратичне відхилення складає 14 років. Цей значний розкид значень варіаційного ряду строку служби T демонструє розмаїття умов експлуатаційного утримання і якості будівництва мостів автодорожньої мережі України.

Для інфраструктури України принципово важливою характеристикою є ресурс автодорожніх мостів. З огляду на факт, що середній термін служби залізобетонних мостів складає

47-50 років виявляється необхідність детального дослідження в часі процесу погіршення їх технічного стану.

Таблиця 3

Терміни служби залізобетонних мостів за вибіркою на 01.01.2016

Тип п. б.	Середньозважене значення μ , роки	Середнє квадратичне відхилення σ , роки
Стан 2		
Монолітні	47	19
Зб.-мон.	21	21
Збірні	30	16
Всі типи разом	31	19
Стан 3		
Монолітні	54	15
Зб.-мон.	37	15
Збірні	40	16
Всі типи разом	42	17
Стан 4		
Монолітні	55	13
Зб.-мон.	46	17
Збірні	44	13
Всі типи разом	47	14
Стан 5		
Монолітні	58	11
Зб.-мон.	–	–
Збірні	47	12
Всі типи разом	50	12

Прогноз термінів служби автодорожніх мостів України

Отримані систематизовані фактичні дані термінів служби автодорожніх мостів, нижче порівнюються з даними за моделлю прогнозу ресурсу мостів України за ДСТУ-Н [12]. Ця стохастична модель прийнята в системі експлуата-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ції автодорожніх мостів починаючи з 2002 року [2]. В формулюванні моделі постулюється, що швидкість деградації описується одним параметром λ – показником інтенсивності відмов. Цей показник приймається постійним, незалежним від часу $\lambda = \lambda(t)$. За функцію надійності прийнята інтегральна функція розподілу $P(t)$ для часу T_n , котрий протікає доки стануться всі n подій процесу (розподіл Пуассона):

$$P(t) = 1 - P(T_n > t) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (8)$$

де λ – параметр процесу інтенсивність відмов (швидкість деградації).

Тут P_i – ймовірність того, що елемент перейде в стан k протягом часу $t < T_k$. Таким чином, при заданій інтенсивності відмов λ , залежністю (8) встановлюється зв'язок між надійністю елемента P_i в i -му стані та часом t , що пройшов від початку експлуатації до стану $i = 2, \dots, 5$. При $k=5$ функція має вид:

$$P_i = 0,00833(\lambda t)^5 \exp(-\lambda t). \quad (9)$$

Для кожної групи мостів, що поділені за технічним станом, для середнього терміну служби за ДСТУ-Н [12] було визначено швидкість деградації і підставлено в формулу (9). Отриманий прогноз термінів служби занесений до табл. 4.

Таблиця 4

Прогноз технічного стану всіх типів мостів за ДСТУ-Н [12] та фактичні терміни служби

Стан	Прогноз за [12], роки	Фактичні терміни служби, роки	Розходження, %
2	31	31	0
3	45	42	7
4	60	47	22
5	74	50	48

В таблиці (див. табл. 4) представлені систематизовані дані оцінки ресурсу вибірки з 6919 елементів. Прогноз термінів служби в таблиці 4 представлений для всіх станів, крім другого, в діапазоні 3-24 роки. Це зумовлено тим, що в першому технічному стані знаходяться тільки нові мости, кількість яких недостатня для прогно-

зу з очікуваною достовірністю, так як історія експлуатації для цієї групи відсутня. Тому на рис. 2 та рис. 3 фактичні терміни служби збігаються з прогнозованими за моделлю ДСТУ-Н [12].

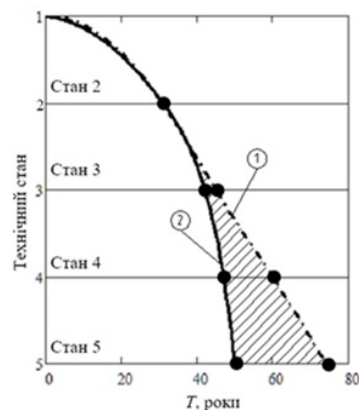
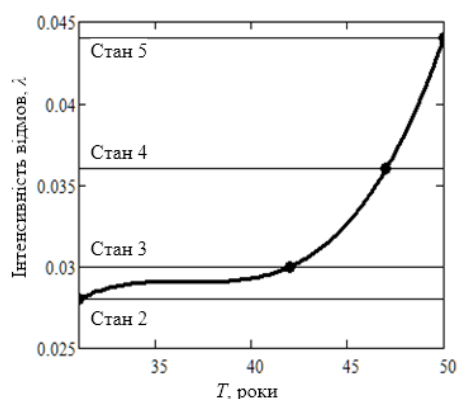


Рис. 2. Графік моделей прогнозу термінів служби:
1 – крива моделі прогнозу [12] залишкового ресурсу;
2 – крива моделі прогнозу по фактичним термінам служби; // – заштрихована область графіку, це діапазон прогнозу

Рис. 3. Інтенсивність відмов залежна від часу $\lambda(t)$

Практика автодорожніх мостів показала, що можна підняти технічний стан шляхом ремонту і реконструкції не вище другого експлуатаційного стану. Це положення закріплено також в регламентаціях ДСТУ-Н [12].

Діапазон прогнозу в 3-24 роки (див. рис. 2) та розходження до 48 % для станів 3-5 пояснюється змінною швидкістю деградації λ (див. рис. 3), для кожної групи мостів, які відрізняються багатьма факторами: особливостями проекту, якістю будівництва, умовами експлуатації та ін.

Пропонується наступна модель прогнозу за фактичними термінами служби мостів (див. рис. 2) побудована в програмі MathCad інтерполяцією квадратичного сплайна по заданим точкам з таблиці (див. табл. 4):

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$S(t) = a_i(t - t_i)^2 + b_i(t - t_i) + c_i, \\ t_{i-1} \leq t \leq t_i, \quad i = 2, 3 \dots 5 \quad (10)$$

де a_i, b_i, c_i – коефіцієнти функції квадратичної параболи для кожного проміжку.

З рисунка (див. рис. 3) очевидно, що швидкість деградації λ не є постійною і залежить від часу.

Графік інтенсивності відмов (див. рис. 3) побудований в програмі MathCad інтерполяцією кубічного сплайна по заданим точкам з таблиці (див. табл. 4):

$$\lambda(t) = a_i + b_i(t - t_i) + \frac{c_i}{2}(t - t_i)^2 + \frac{d_i}{6}(t - t_i)^3, \\ t_{i-1} \leq t \leq t_i, \quad i = 2, 3, 4, \quad (11)$$

де a_i, b_i, c_i, d_i – коефіцієнти сплайн-функції для кожного проміжку.

Висновки

1. За статистичними даними середній термін служби мостів України складає 47-50 років, що є майже в двічі нижче ніж регламентований [7]. Середнє квадратичне відхилення складає 14 років. Цей значний розкид значень варіаційного ряду строку служби T демонструє розмаїття умов експлуатаційного утримання і якості будівництва мостів автодорожньої мережі України

2. Отримана статистична модель (10) прогнозу термінів служби мостів за фактичними даними враховує зміну інтенсивності відмов $\lambda(t)$ з часом, але не враховує особливості проекту і експлуатації для кожної групи мостів окремо. Також слід зауважити, що середні терміни служби для мостів в 5 технічному стані отримані з малочисельної вибірки (122 од.). Існуючі моделі прогнозу є недостатньо точними і мають похибку в діапазоні 50-74 роки (див. рис. 2) для 5-ого технічного стану.

3. В моделі ДСТУ-Н [12], показник інтенсивності відмов приймається постійним, незалежним від часу $\lambda = \lambda(t)$. Наше дослідження (див. рис. 3) показало, що показник інтенсивності відмов λ змінний в часі. Це пояснює розходження до 24 років між прогнозованими термінами служби і фактичними (див. рис. 2). Модель ДСТУ-Н [12] потребує модернізації так, як може завищувати очікуванні терміни служби до 48 % (див. рис. 2).

Це дослідження було виконано під керівництвом доктора технічних наук, професора Лантуха-Лященко А. І. Висловлюю йому мою щирю подяку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боднар, Л. П. Програмний комплекс АЕСУМ. Сучасний стан та концепція подальшого розвитку [Текст] / Л. П. Боднар // Дороги і мости : зб. наук. праць ДерждорНДІ. – Київ, 2010. – Вип. 12. – С. 31-39.
2. ВБН В.3.1-218-174-2002 Оцінка технічного стану автодорожніх мостів, що експлуатуються [Текст]. – Київ : Укравтодор, 2002.
3. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Москва : Высш. школа, 2000. – 383 с.
4. Давиденко, О. О. Оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів України [Текст] / О. О. Давиденко // Автошляховик України. – 2014. – Вип. 237. – С. 29-35.
5. Давыденко, А. А. Марковские модели накопления повреждений в оценке и прогнозировании технического состояния мостов [Текст] / А. А. Давыденко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2014. – Вип. 6. – С. 40-47.
6. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування [Текст]. – Надано чинності 2009-11-11. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 73 с.
7. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – Надано чинності 2007-02-01. – Київ : Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
8. ДБН В.2.3-6:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування [Текст]. – Надано чинності 2010-03-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 42 с.
9. Теорія ймовірностей і математична статистика для наукових працівників та інженерів [Текст] / І. І. Горбань – Київ, 2003. – С. 244.
10. Дехтяр, А. С. Оптимальні терміни й об'єми ремонтів залізобетонних мостів [Текст] / А. С. Дехтяр // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій : зб. наук. праць. – Львів : Каменярь, 2001. – Вип. 3. – С. 83-86
11. ДСТУ Б.В.2.3-24:2009 Споруди транспорту. Труби дорожні. Обстеження та оцінювання технічного стану [Текст]. – Надано чинності 2009-12-21. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 15 с.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

12. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2013 Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів [Текст]. – Надано чинності 2009-11-11. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. – 49 с.
13. Лантух-Лященко, А. І. До проекту державних будівельних норм з оцінки технічного стану мостів [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій : зб. наук. праць. – Львів : Каменяр, 2000. – Вип. 2. – С. 78-83.
14. Лантух-Лященко, А. І. Наукові розробки з нормативного забезпечення [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Дороги і мости : зб. наук. праць ДерждорНДІ. – Київ, 2003. – С. 76-99.
15. Лантух-Лященко, А. І. Марковські моделі деградації залізобетонних елементів мостів [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Промислове будівництво та інженерні споруди. – Київ, 2009. – Вип. 2. – С. 22-25.
16. Лантух-Лященко, А. І. Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Вісник Транспортної Академії України. – Київ, 1999. – Вип. 3. – С. 59-63.
17. Посібник до ДСТУ-Н Б.В.2.3-23 з оцінки і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Укравтодор, – Київ : 2011.
18. СОУ 42.1-37641918 – 093:2012 Мости та труби. Варіантне проектування мостів. – Київ : Укравтодор, 2012.
19. СОУ 45.2-00018112-026:2008 Споруди транспорту. Дефекти автодорожніх мостів. Класифікація. – Київ : Укравтодор, 2008.
20. Янчук, Л. Л. Аналіз тріщиностійкості залізобетонних елементів мостів як практичний апарат прогнозу ресурсу [Текст] / Л. Л. Янчук // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2014. – Вип. 6 – С. 132-137.
21. Яцко, Ф. В. Довговічність захисного шару залізобетонних елементів мостів [Текст] / Ф. В. Яцко // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту заліз. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 33. – С. 190-196.
22. Експлуатація і реконструкція мостів [Текст]. Підручник. Друге видання. / [Страхова Н.Є. та ін. Наукове редагування Лантух-Лященко А.І.] – УТУ, ТАУ. Вид.: “Донеччина”, 2002, 402 с.
23. Miner, M. A., Cumulative damage in fatigue / Miner, M. A. // J. Applied Mech., –1945–12 (1945) – pp. 159–164.
24. Frangopol (1999). Life-cycle cost analysis for bridges. In D. M. Frangopol, editor, Bridge Safety and Reliability, pages 210-236. ASCE, Reston, Virginia.

А. А. ДАВЫДЕНКО*

* Кафедра «Мосты и тоннели», Национальный транспортный университет, ул. Суворова 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (050) 471 33 99, эл. почта alexsandros@inbox.ru, ORCID 0000-0003-0176-3256

СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ УКРАИНЫ

Цель. Предоставить статистическую модель прогноза долговечности автодорожных мостов Украины. **Методика.** Теоретическое исследование. **Результаты.** Разработана модель прогноза долговечности на основании статистического анализа данных технического состояния железобетонных автодорожных мостов. **Научная новизна.** Впервые выполнен статистический анализ долговечности автодорожных мостов, которые находятся в эксплуатации. **Практическое значение.** Полученные результаты являются практическим инструментом управления надежностью и ресурсом железобетонных автодорожных мостов.

Ключевые слова: автодорожные мосты; долговечность; жизненный цикл; остаточный ресурс

А. А. DAVYDENKO*

* Department of Bridges and Tunnels, National Transport University, 1 Suvorov str., Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (050) 471 33 99, e-mail alexsandros@inbox.ru, ORCID 0000-0003-0176-3256

STATISTICAL PREDICTION OF TECHNICAL STATE ROAD BRIDGES OF UKRAINE

Purpose. To provide statistical prediction model of highway bridges durability in Ukraine. **Methodology.** Theoretical study. **Findings.** The model of durability prediction based on statistical data analysis of technical state of

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

reinforced concrete for highway bridges was developed. **Originality.** For the first time statistical analysis of the durability of road bridges that are in operation was carried out a. **Practical value.** The results are a practical management tool for reliability and resource of reinforced concrete highway bridges.

Keywords: road bridges; durability; life cycle; residual life

REFERENCES

1. Bodnar L. P. Prohramnyy kompleks AESUM. Suchasnyy stan ta kontsepsiya podalshoho rozvytku [The software package AESUM. Current state and further development concept]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho dorozhnoho naukovykh doslidnoho instytutu imeni M. P. Shulhina "Dorohy i mosty"* [Proc. Of State Road Research Institute named after M. P. Shulgin "Roads and bridges"], 2010, issue 12, pp. 31-39.
2. VBN V.3.1-218-174-2002. Otsinka tekhnichnoho stanu avtodorozhnykh mostiv, shcho ekspluatuyutsya [Institutional building codes V.3.1-218-174-2002. Evaluation of the technical state highway bridges exploited]. Kyiv, Ukravtodor Publ., 2002.
3. Venttsel Ye. S., Ovcharov L. A. *Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of casual processes and her engineering applications]. Moscow, Energiya Publ., 2000. 383 p.
4. Davidenko O. O. Otsinka tekhnichnoho stanu i prohnozuvannya zalyshkovoho resursu avtodorozhnykh mostiv Ukrainy [Assessment of technical condition and forecasting residual life of highway bridges Ukraine]. *Avtoshlyahovyk Ukrainy – Avtoshlyahovyk Ukraine*, 2014, issue 237, pp. 29-35.
5. Davydenko A. A. Markovskie modeli nakopleniya povrezhdeniy v otsenke i prognozirovaniy tekhnicheskogo sostoyaniya mostov [Markov model of damage accumulation in the assessment and forecasting of technical condition of the bridges]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2014, issue 6, pp. 40-87.
6. DBN V.2.3-22-2009. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannya* [State Standard V.2.3-22-2009. Transport constructions. Bridges and pipes. Basic design requirements]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2009. 73 p.
7. DBN V.2.3-14-2006. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannya* [State Standard V.2.3-14-2006. Transport constructions. Bridges and pipes. Design rule]. Kyiv, Ministerstvo budivnytstva, arkhitektury i zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Publ., 2006. 359 p.
8. DBN V.2.3-6-2009. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennya i vyprobuvannya* [State Standard V.2.3-6-2009. Transport constructions. Bridges and pipes. Inspection and testing]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2009. 42 p.
9. Horban I. I. *Teoriia ymovirnostei i matematychna statystyka dlia naukovykh pratsivnykiv ta inzheneriv* [Probability and Mathematical Statistics for scientists and engineers]. Kyiv, Energiya Publ., 2003. 244 p.
10. Dehtyar A. S. Optymalni terminy y obyemy remontiv zalizobetonnykh mostiv [Optimal timing and volumes of repair of reinforced concrete bridges]. *Diahnostyka, dovgovichnist ta rekonstruktsiya mostiv i budivelnnykh konstruktsiy – Diagnosis, durability and reconstruction of bridges and building structures*, 2001, issue 3, pp. 83-86.
11. DSTU B.V.2.3-24-2009. *Sporudy transportu. Trubi dorozhni. Obstezhennya ta otsinyuvannya tehnikhnogo stanu* [State Standard B.V.2.3-24-2009. Transport constructions. Pipes Road. Examination and evaluation of technical condition]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2009. 15 p.
12. DSTU-N B.V.2.3-23-2013. *Sporudy transportu. Nastanova z otsinyuvannya i prognozuvannya tehnikhnogo stanu avtodorozhnykh mostiv* [State Standard B.V.2.3-23-2013. Transport constructions. Guidance evaluation and forecasting technical condition of road bridges]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2013. 49 p.
13. Lantuh-Lyaschenko A. I. Do proektu derzhavnykh budivelnnykh norm z otsinky tekhnichnoho stanu mostiv [The project of state building codes to assess the technical condition of bridges]. *Diaagnostika, dovgovichnist ta rekonstruktsiya mostiv i budivelnnykh konstruktsiy – Diagnosis, durability and reconstruction of bridges and building structures*, 2000, issue 2, pp. 78-83.
14. Lantuh-Lyaschenko A. I. Naukovi rozrobky z normatyvnoho zabezpechennya [Scientific development of regulatory support]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho dorozhnoho naukovykh doslidnoho instytutu imeni M. P. Shulhina "Dorohy i mosty"* [Proc. Of State Road Research Institute named after M. P. Shulgin "Roads and bridges"], 2003, issue 3, pp. 76-99.
15. Lantuh-Lyaschenko A. I. Markovski modeli degradatsiyi zalizobetonnykh elementiv mostiv [Markov models degradation bridges concrete elements]. *Promislove budivnistvo ta inzhenerni sporudy* [Industrial construction and engineering structures], 2009, issue 2, pp. 22-25.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

16. Lantuh-Lyaschenko A. I. Otsinka tekhnichnoho stanu transportnykh sporud, shcho znakhodyatsya v ekspluatatsiyi [Assessment of the technical state of transport facilities that are in operation]. *Visnyk Transportnoyi Akademiyi Ukrayiny* [Bulletin of Transport Academy of Ukraine], 1999, issue 3, pp. 59-63.
17. *Posibnyk do DSTU-N B.V.2.3-23 z otsinky i prohnozuvannya tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv* [Guide for ISO-N B.V.2.3-23 assessment and prediction of technical condition of road bridges]. J. Kyiv, Derzhpozhyvstandart Ukrainy Publ., 2011.
18. *SOU 42.1-37641918-093-2012. Mosty ta truby. Variantne proektuvannya mostiv* [State Standard 42.1-37641918-093-2012. Bridges and pipes. Variant design of bridges]. Kyiv, Ukravtodor Publ., 2012.
19. *SOU 45.2-00018112-026-2008. Sporudy transportu. Defekty avtodorozhnikh mostiv. Kласифікація* [State Standard 45.2-00018112-026-2008. Transport constructions. Defects of highway bridges. Classification]. Kyiv, Ukravtodor Publ., 2008.
20. Yanchuk L. L. Analiz trishchynosti ykosti zalizobetonnykh elementiv mostiv yak praktychnyy aparat prohnozu resursu [Analysis of crack concrete elements as a practical bridge device resource forecasting]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2014, issue 6, pp. 132-137.
21. Yatsko F. V. Dovhovichnist zakhysnoho sharu zalizobetonnykh elementiv mostiv [The durability of the protective layer of concrete elements bridge]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 33, pp. 190-196.
22. Strakhova N. Ye, naukovе redahuvannya Lantukh-Liashchenko A. I. *Ekspluatatsiia i rekonstruktsiia mostiv. Pidruchnyk. Druhe vydannia*. [Maintenance and reconstruction of bridges. Textbook. Second edition]. Donetsk, Donechchyna Publ., 2002. 402 p.
23. Miner, M. A. *Cumulative damage in fatigue*. J. Applied Mech., 1945, 12 (1945), pp. 159-164.
24. Frangopol (1999). *Life-cycle cost analysis for bridges*. In D. M. Frangopol, editor, Bridge Safety and Reliability, pages 210-236. ASCE, Reston, Virginia.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н, проф. А. І. Лантухом-Лященко (Україна), д.т.н., проф. Д. О. Банниковим (Україна).

Надійшла до редколегії 26.10.2016.

Прийнята до друку 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.072.2.012.45-027.45

В. С. ДОРОФЄЄВ¹, В. М. КАРПЮК², К. І. АЛБУ³, Ю. А. СЬОМІНА^{4*}

¹ Кафедра «Залізобетонні та кам'яні конструкції», Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (048) 729 86 20, ел. пошта dorvs@ukr.net

² Кафедра «Залізобетонні та кам'яні конструкції», Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (067) 486 56 74, ел. пошта v.karpiuk@ukr.net

³ Кафедра «Залізобетонні та кам'яні конструкції», Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (67) 188 82 43, ел. пошта alby_katj@mail.ru

^{4*} Кафедра «Залізобетонні та кам'яні конструкції», Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (093) 551 32 80, ел. пошта syomina3091@mail.ru

МІЦНІСТЬ ТА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДІЇ МАЛОЦИКЛОВИХ ЗНАКОПОСТІЙНИХ І ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВИСОКИХ РІВНІВ

Мета. Дослідити та проаналізувати поведінку приопорних ділянок прогінних залізобетонних балкових елементів за дії малоциклових знакопостійних і знакозмінних навантажень з урахуванням конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії задля подальшого використання отриманих результатів при вдосконаленні інженерної методики їх розрахунку. **Методика.** Для вивчення зазначеної проблеми виконано 3 серії експериментальних досліджень. Дослідні зразки – це залізобетонні балки прямокутного перерізу з розмірами 200×100 мм, довжиною 1975 мм, армовані двома плоскими зварними каркасами з симетрично розташованою поздовжньою нижньою та верхньою арматурою 2 Ø 14 A500C і поперечною 2 Ø 3, 4, 5 BpI з відносними прольотами зрізу $a / h_0 = 1, 2, 3$, виготовлені з важкого бетону класів C 16/20, C 30/35, C 40/50 та випробувані короткочасним статичним, малоцикловим знакозмінним ($\eta = \pm 0,50; \pm 0,65; \pm 0,80$) та циклічним знакопостійним ($\eta = 0 \dots 0,50; 0 \dots 0,65; 0 \dots 0,85$) навантаженнями. **Результати.** Введеному матеріалі розглядаються та аналізуються отримані та оброблені експериментальні дані, які розкривають вплив малоциклових знакопостійних та знакозмінних навантажень високих рівнів на основні показники тріщиностійкості та міцності похилих і нормальних перерізів приопорних ділянок прогінних залізобетонних конструкцій, ураховуючи зміну обраних при плануванні експерименту конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії. **Наукова новизна.** В статті приведені систематизовані дослідні дані, які відображають нові особливості роботи залізобетонних балкових елементів за дії навантажень вказаних видів. **Практична значимість.** Результати досліджень за обраною тематикою впроваджуються в практику проектування та розрахунків приопорних ділянок прогінних залізобетонних елементів, які зазнають дії малоциклових навантажень, а також можуть бути використані у навчальному процесі ВНЗ технічного профілю.

Ключові слова: малоциклове знакозмінне навантаження; циклічне знакопостійне навантаження; міцність; тріщиностійкість; математична модель; залізобетонна балка

Вступ

У зв'язку з тим, що малоциклові знакопостійні та знакозмінні навантаження виникають доволі часто та діють на елементи залізобетонних конструкцій специфічним чином – їхній вплив на механічні та деформативні параметри зразків потребує детального і ґрунтового вивчення та аналізу. Адже процеси, які проходять в елементі за дії вказаного виду навантаження

зумовлені нелінійністю деформування, мікโตรіщиноутворенням, накопиченням залишкових деформацій, малоцикловою втомленістю, розшукцільненням бетону та ін.

Постановка проблеми

Потрібно зауважити, що у національних вітчизняних і закордонних нормативних документах повною мірою особливості дії циклічних

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

знакопостійних, а особливо, знакозмінних навантажень не враховуються, не дивлячись на певні відмінності дії вказаних навантажень від дії короточасних одноразових. Тому є доцільним проведення досліджень у цьому напрямку та поповнення банку експериментальних даних заради вдосконалення інженерних методик розрахунку приопорних ділянок залізобетонних балкових елементів при вказаних умовах.

Аналіз останніх досліджень

Достатньо багато вітчизняних та закордонних вчених проводили дослідження стосовно вказаного питання. Ще з 1961 року проблемою опору залізобетону дії циклічного навантаження займався Л. П. Макаренко та його учні: Є. М. Бабич, Н. М. Бітько, А. В. Гергель, В. В. Масліченко, Г. Х. Масюк, В. Н. Рубель, І. Д. Свиначенко, Г. А. Фенко та ін.

У питанні побудови діаграм деформування бетону за дії малоциклових навантажень значних успіхів досягли М. І. Карпенко [14], Т. М. Пецольд, В. В. Тур [23], Ю. Г. Болошенко [3] та ін.

Відомі роботи Є. М. Бабича [1], Г. Х. Масюка [21], Й. Й. Лучка [20], В. С. Дорофєєва [6, 7, 26], В. М. Карпюка [15-17], П. С. Гомона [5], О. О. Заречанського [10], М. С. Зінчука [11], С. Х. Карапетяна [13], О. І. Корнійчука [19], П. І. Герба [4], С. Я. Дробішинця [8], В. Є. Бабича [2], Я. І. Ковальчика [18], В. Ю. Каравана [12], О. Н. Кухнюка, Ю. М. Панчука, І. Т. Мирсаяпова [22] та ін. по вивченню працездатності складнонапружених залізобетонних конструкцій в умовах одноразових, повторних малоциклових та інших навантажень, звичайних, підсилених, при підвищених температурах тощо.

Серед робіт іноземних науковців можна відмітити роботи R. C. Fenwick, A. Fong, J. A. O. Barros, F. Aslani, R. Jowkarmeimandi [24], W. Trapko, T. Trapko [25] та ін.

Не дивлячись на достатньо великий доробок вчених стосовно обраного питання, поки що не існує загальноприйнятого методу розрахунку залізобетонних конструкцій в умовах малоциклових навантажень.

Мета

Мета роботи – встановити вплив конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на показники міцності, тріщиностійкості та дефо-

рмативності залізобетонних балкових конструкцій за дії малоциклових знакопостійних і знакозмінних навантажень.

Методика досліджень

Для вирішення означеного питання згідно з прийнятою методологією [17] було заплановано та виконано 3 серії експериментальних випробувань на дію статичного короточасного, малоциклового знакозмінного, та циклічного знакопостійного навантаження. В якості змінних факторів були обрані наступні: величина відносного прольоту зрізу a/h_0 , яка змінювалась на трьох рівнях: $a=h_0$, $2h_0$ і $3h_0$; клас важкого бетону трьох видів C 16/20, C 30/35, C 40/50; кількість поперечного армування на приопорних ділянках $\rho_{sw} = 0,0016; 0,0029; 0,0044$ (2Ø3, 4 і 5 ВрІ); рівень знакозмінного: $\eta = \pm 0,50; \pm 0,65; \pm 0,80$ та знакопостійного: $\eta = 0 \dots 0,50; 0 \dots 0,65; 0 \dots 0,85$ навантажень від фактичної міцності балок, тобто величини поперечного навантаження напередодні їх руйнування, при якому ширина розкриття похилих тріщин w_k перевищувала 0,4 мм, а стріла прогинів $f \geq l/150$.

Спочатку почергово випробовували за планом В₄ 25 дослідних балок першої серії на дію одноразового короточасного ступенево зростаючого навантаження, практично, до руйнівного стану за вказаними вище ознаками. Надалі випробовували аналогічні дослідні балки другої та третьої серій на дію, відповідно, знакозмінного та знакопостійного небагатоповторного поперечного навантаження згідно плану експерименту. Кількість циклів знакозмінного і знакопостійного навантажень складала не менше 10, якщо зразки не руйнувалися при меншому числі циклів.

Результати

В результаті обробки отриманих експериментальних даних, вилучення незначимих та перерахунку тих коефіцієнтів, що залишилися, за допомогою ефективної комп'ютерної програми COMPEX, розробленої проф. В. А. Вознесенським, отримали адекватні математичні моделі міцності, тобто руйнуючої поперечної сили V_u :

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$\hat{Y}(V_{u,1}) = 98 - 41X_1 + 12X_2 + 6X_3 + 16X_1^2 - 7X_2^2 - 5X_3^2 - 7X_1X_2, \text{ кН}; \quad (1)$$

$$\hat{Y}(V_{u,1} / bh_0) = 5,60 - 2,34X_1 + 0,69X_2 + 0,34X_3 + 0,91X_1^2 - 0,40X_2^2 - 0,29X_3^2 - 0,40X_1X_2, \text{ МПа}; \quad (1, a)$$

$$\hat{Y}(V_{u,2}) = 80 - 33X_1 + 13X_2 + 6X_3 - 2X_4 + 21X_1^2 - 12X_2^2 - 5X_3^2 - 7X_1X_2, \text{ кН}; \quad (2)$$

$$\hat{Y}(V_{u,2} / bh_0) = 4,57 - 1,89X_1 + 0,74X_2 + 0,34X_3 - 0,11X_4 + 1,20X_1^2 - 0,69X_2^2 - 0,29X_3^2 - 0,40X_1X_2, \text{ МПа}; \quad (2, a)$$

$$\hat{Y}(V_{u,3}) = 90 - 36X_1 + 10X_2 + 7X_3 - 3X_4 + 18X_1^2 - 6X_2^2 - 6X_3^2 - 2X_4^2 - 8X_1X_2 + 2X_1X_4, \text{ кН}; \quad (3)$$

$$\hat{Y}(V_{u,3} / bh_0) = 5,14 - 2,06X_1 + 0,57X_2 + 0,40X_3 - 0,17X_4 + 1,03X_1^2 - 0,34X_2^2 - 0,34X_3^2 - 0,11X_4^2 - 0,46X_1X_2 + 0,11X_1X_4, \text{ МПа}. \quad (3, a)$$

Геометрична інтерпретація приведеної несучої здатності приопорних ділянок дослідних зразків-балок частково може бути представлена на рис. 1.

Серед конструктивних чинників найбільший вплив на несучу здатність приопорних ділянок дослідних елементів має прольот зрізу (див. рис. 1, а). В цілому, підтверджується виявлена О. С. Залесовим, Ю. А. Климовим [9] та іншими дослідниками [4-8, 10-13, 14-22] закономірність нелінійного (затухаючого) зменшення міцності похилих перерізів балок зі збільшенням прольоту зрізу.

З підвищенням класу бетону від C16/20 до C40/50 відбувається нелінійне затухаюче (непропорційне) збільшення міцності вказаних ділянок у всіх серіях (див. рис. 1, б).

Аналогічна картина спостерігається з підвищенням коефіцієнту поперечного армування ρ_{sw} від 0,0016 до 0,0044 (див. рис. 1, в).

Фактори зовнішнього впливу, насамперед, характер циклічного навантаження, має суттєвий вплив на вихідний параметр, що розглядається. Так, якщо при знакопостійному малоци-

кловому навантаженні середнє значення міцності приопорних ділянок дослідних зразків зменшується на 8,2 % порівняно з несучою здатністю балок першої серії, випробуваних без повторного навантаження, то при знакозмінному циклічному навантаженні – на 18,4 %. Така тенденція зберігається у всіх діапазонах зміни дослідних факторів (див. рис. 1, а, б, в, г). При цьому, величина рівнів знакозмінного та знакопостійного навантаження ($\eta = \pm 0,50 \dots \pm 0,80$; $0 \dots 0,80$) мало впливає на кінцевий результат (див. рис. 1, г).

Під час випробувань дослідних зразків-балок на дію короткочасного одноразового та малоциклового навантаження слідували за утворенням, розвитком та шириною розкриття тріщин на їхній поверхні.

Максимальна ширина розкриття нормальних тріщин на рівні розтягнутої арматури в зоні чистого згину при заданих планом рівнях навантаження майже не залежить від його виду і може бути охарактеризована наступною математичною моделлю (4) геометрична інтерпретація якої може бути представлена на рис. 2.

$$\hat{Y}(w_{cr,1,2,3}^{\perp, \eta Fu}) = 0,14 + 0,02X_1 + 0,03X_2 + 0,01X_3 + 0,05X_4 + 0,01X_1^2 - 0,03X_2^2 + 0,02X_4^2 + 0,01X_1X_3 + 0,01X_1X_4 + 0,02X_2X_4 + 0,01X_3X_4, \text{ мм}. \quad (4)$$

Аналіз математичної моделі (4) показує, що максимальна ширина розкриття нормальних тріщин в зоні чистого згину в зазначених серіях збільшується порівняно з середнім значенням 0,14 мм при середніх значеннях дослідних факторів:

- зі збільшенням величини відносного прольоту зрізу a / h_0 від 1 до 3 на 29 %;
- зі збільшенням класу бетону від C 16/20 до C 40/50 (власне, до C 30/35) на 43 %;
- зі збільшенням кількості поперечного армування ρ_{sw} від 0,0016 до 0,0044 на 14 %;

- з підвищенням рівня навантаження η від 0,5 до 0,8 F_u на 71 %;

- одночасним збільшенням:

- величини відносного прольоту зрізу і кількості поперечного армування в зазначених межах на 7 %;
- величини відносного прольоту зрізу і рівня навантаження на 7 %;
- класу бетону внаслідок збільшення несучої здатності і рівня навантаження на 14 %;
- кількості поперечного армування за тією ж причиною і рівня навантаження на 7 %.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

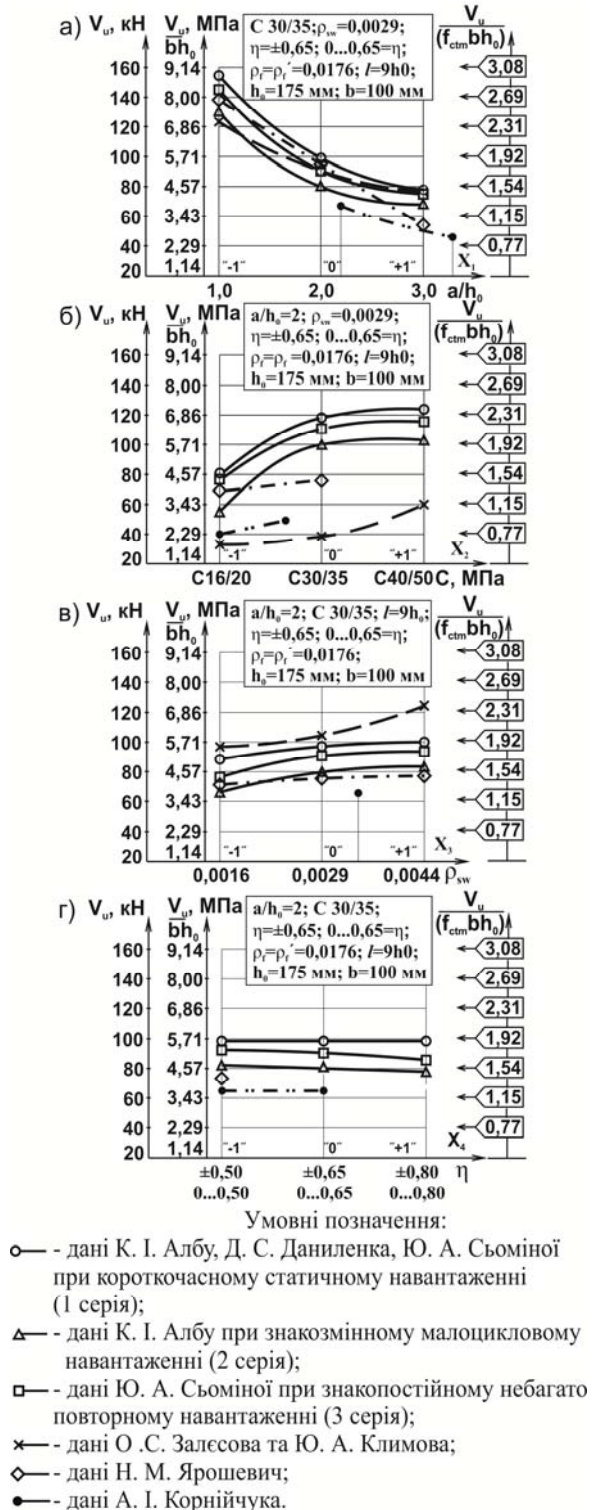


Рис. 1. Вплив конструктивних чинників (прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г) на міцність приопорних ділянок випробуваних балок

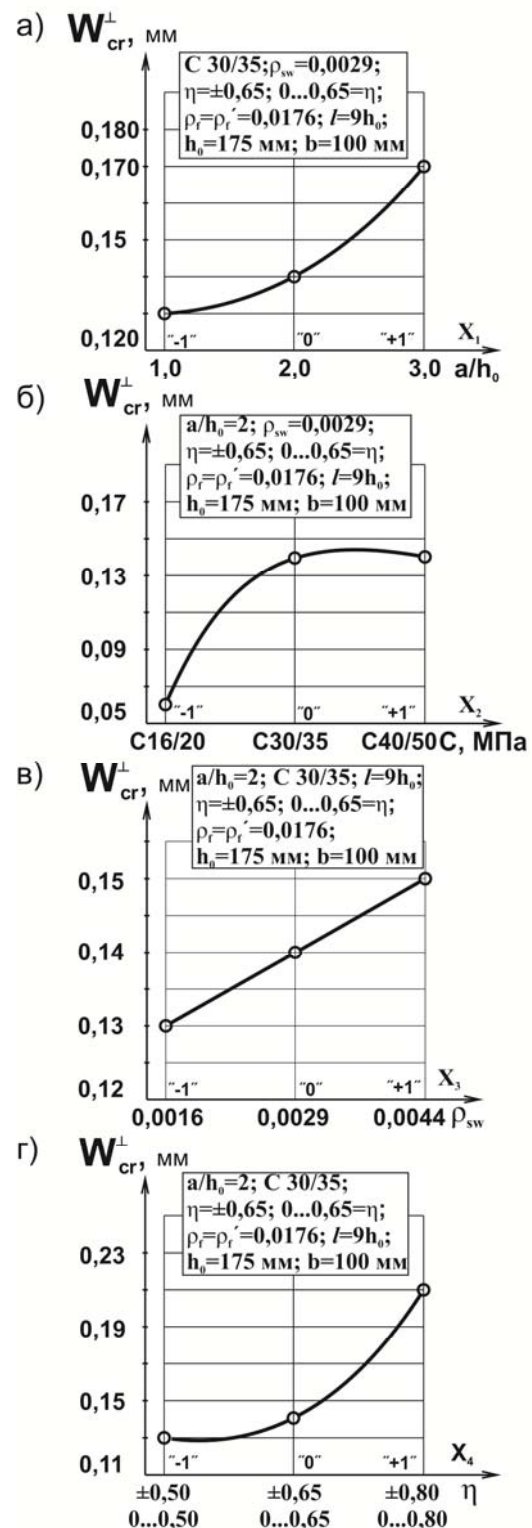


Рис. 2. Вплив величини відносного прольоту зрізу (а), міцності бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г) на максимальну ширину відкриття нормальних тріщин в зоні чистого згину при заданих планом рівнях навантаження

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Максимальна ширина розкриття похилих тріщин посередині висоти приопорних ділянок при заданих планом рівнях навантаження у серіях, що розглядаються, може бути охарактери-

зована трьома подібними за структурою математичними моделями (5)-(7) геометрична інтерпретація яких відображена на рис. 3.

$$\hat{Y}(w_{cr,1}^{Fu}) = 0,35 - 0,06X_1 - 0,03X_2 - 0,01X_3 - 0,14X_4 - 0,01X_1X_3 - 0,03X_2X_4 - 0,02X_3X_4, \text{ мм}; \quad (5)$$

$$\hat{Y}(w_{cr,2}^{Fu}) = 0,63 + 0,05X_1 + 0,05X_2 - 0,06X_3 + 0,24X_4 - 0,02X_2^2 + 0,02X_3^2 + 0,02X_4^2 + 0,11X_1X_2 - 0,03X_1X_3 - 0,06X_3X_4, \text{ мм}; \quad (6)$$

$$\hat{Y}(w_{cr,2}^{Fu}) = 0,40 - 0,05X_1 - 0,03X_2 + 0,16X_4 - 0,03X_1X_3, \text{ мм}. \quad (7)$$

Для можливості порівняння отриманих експериментальних даних з результатами досліджень інших авторів доцільно представити максимальні довжини проекцій та кути нахилу

небезпечних похилих тріщин до поздовжньої осі дослідних елементів у вигляді приведених до робочої висоти перерізу лінійних моделей по серіях:

$$\hat{Y}(\max l'_{cr,1} / h_0) = 1,15 + 0,30X_1 - 0,11X_3 - 0,02X_1X_2 - 0,13X_1X_3; \quad (8)$$

$$\hat{Y}(\max l'_{cr,2} / h_0) = 0,99 + 0,23X_1 - 0,09X_3 + 0,11X_4 + 0,09X_1X_2 - 0,04X_1X_3; \quad (9)$$

$$\hat{Y}(\max l'_{cr,3} / h_0) = 0,89 + 0,07X_1 + 0,19X_4 + 0,16X_1X_4, \quad (10)$$

графічне відображення яких представлено на рис. 4.

Аналіз представлених моделей показує, що середні значення небезпечної похилої тріщини при малоциклового знакозмінному навантаженні зменшуються на 14 %, а при знакопостійному – на 23 %.

Небезпечні похилі тріщини збільшуються по відношенню до своїх середніх значень у 1, 2 і 3 серіях:

- зі збільшенням відносного прольоту зрізу a / h_0 від 1 до 3 на 52, 46 і 16 %, відповідно, у 1, 2 і 3 серіях;

- зі збільшенням кількості поперечного армування ρ_{sw} від 0,0016 до 0,0044 на 19 і 18 % у 1 і 2 серіях;

- зі збільшенням рівня малоциклового знакозмінного і знакопостійного навантаження від 0,5 до 0,8, відповідно, на 22 і 43 %;

- при одночасному збільшенні прольоту зрізу і класу бетону у 2 серії на 9 %;

- при одночасному збільшенні прольоту зрізу і зменшенні кількості поперечної арматури у 1 серії на 11 %, а у 2 серії – на 4 %;

- при одночасному збільшенні прольоту зрізу і рівнів знакозмінного на 8 % і знакопостійного на 18 % навантаження;

- при одночасному зменшенні кількості поперечної арматури і збільшенні рівня знакозмінного навантаження на 6 %.

Обробка експериментальних значень кутів нахилу небезпечної похилої тріщини до поздовжньої осі елемента у дослідних серіях дозволила отримати наступні математичні моделі:

$$\hat{Y}(\alpha_{cr,1}^{\circ}) = 41,2 - 6,8X_1 + 1,6X_2 + 2X_3, \text{ град.}; \quad (11)$$

$$\hat{Y}(\alpha_{cr,2}^{\circ}) = 43,0 - 5,3X_1 - 2,9X_4, \text{ град.}; \quad (12)$$

$$\hat{Y}(\alpha_{cr,3}^{\circ}) = 46,5 - 2,1X_1 - 5,2X_4, \text{ град.}, \quad (13)$$

геометрична інтерпретація яких наведена на рис. 5.

Аналіз досить простих лінійних моделей (11)...(13) показує, що кути нахилу небезпечних похилих тріщин зменшуються по відношенню до своїх середніх значень 41,2°; 43,0°; 46,5°, відповідно, у 1, 2 і 3 серіях дослідів:

- при збільшенні відносного прольоту зрізу a / h_0 від 1 до 3 на 33, 25 і 9 %;

- при збільшенні рівнів малоциклового знакозмінного і знакопостійного навантажень від 0,5 до 0,8, відповідно, на 13 і 22 %;

- при зменшенні класу бетону від C 40/50 до C 16/20 на 8 % і кількості поперечної арматури ρ_{sw} від 0,0044 до 0,0016 на 10 % у серії дослідів при однократному статичному ступенево зростаючому навантаженні.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

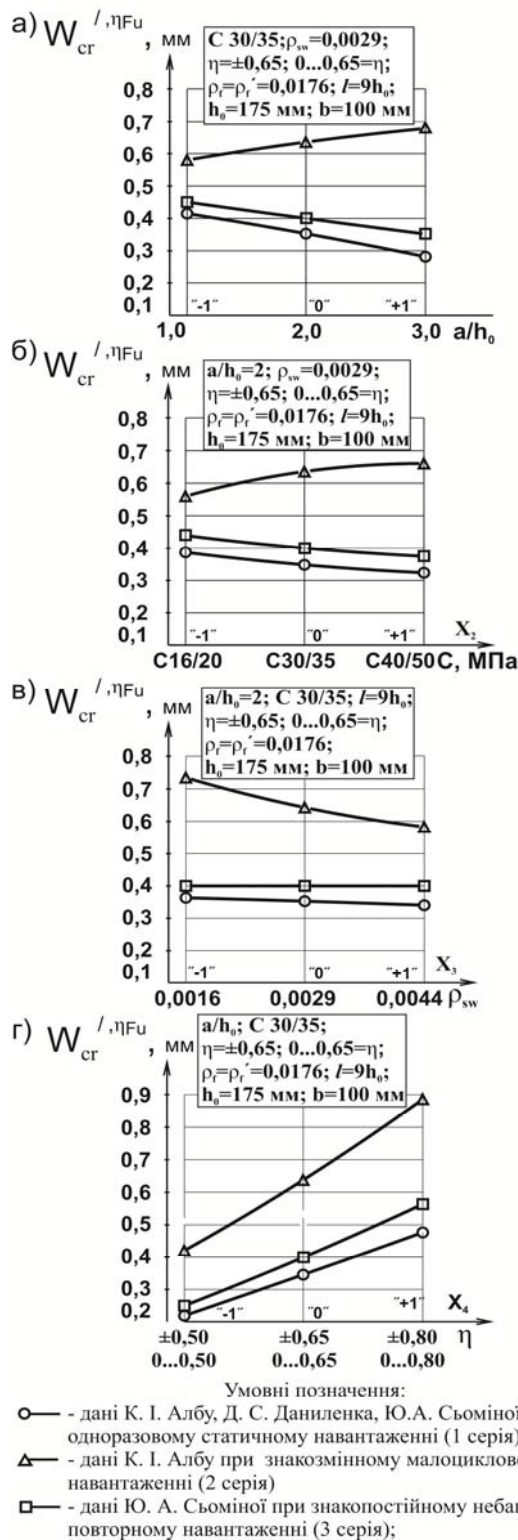


Рис. 3. Залежність максимальної ширини розкриття похилих тріщин на приопорних ділянках при заданих планових рівнях навантаження від відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г)

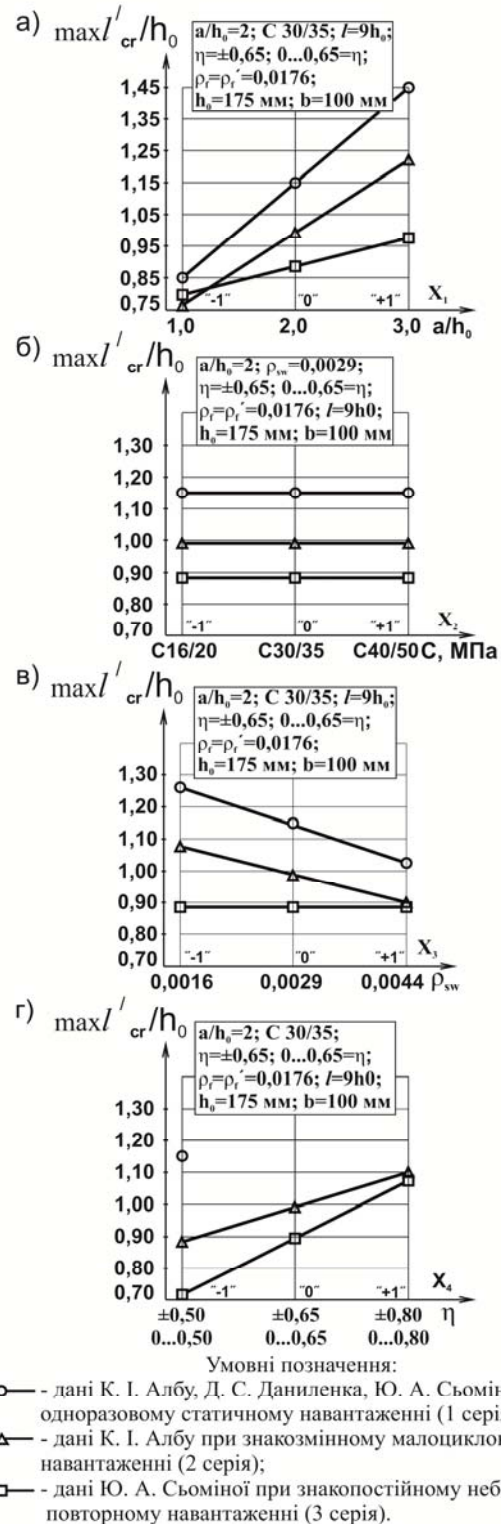


Рис. 4. Залежність максимальної довжини проекції небезпечної похилої тріщини на поздовжню вісь балки перед руйнуванням від величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Відносні відстані між нормальними тріщинами в зоні чистого згину в проведених дослідженнях охарактеризовані моделями:

$$\hat{Y}(l_{cr,1}^{\perp} / h_0) = 0,39 - 0,03X_1 + 0,01X_2 + 0,02X_1X_3; \quad (14)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,2}^{\perp} / h_0) = 0,41 - 0,014X_1 + 0,011X_2 - 0,01X_3; \quad (15)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,3}^{\perp} / h_0) = 0,38 - 0,02X_1 + 0,01X_2 - 0,01X_3 - 0,03X_4 - 0,01X_1X_2, \quad (16)$$

графічне зображення яких показане на рис. 6.

Як видно з моделей (14)...(16), приведені до h_0 середні відстані між вказаними тріщинами є досить близькими по серіях і коливаються у межах 0,38...0,41. Окрім того, характер впливу

дослідних факторів по серіях, як видно з рисунку (див. рис. 6, а, б, в), є однотипним.

Аналогічні математичні моделі відносних віддалей між похилими тріщинами на приопорних ділянках елементів мають вигляд:

$$\hat{Y}(l_{cr,1}^{\parallel} / h_0) = 0,55 + 0,15X_1 + 0,01X_2 - 0,02X_3; \quad (17)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,2}^{\parallel} / h_0) = 0,56 + 0,13X_1 - 0,03X_3 + 0,04X_1X_2 - 0,02X_1X_3 - 0,03X_2X_3; \quad (18)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,3}^{\parallel} / h_0) = 0,38 + 0,07X_1 + 0,01X_2 - 0,01X_3 - 0,02X_1X_3, \quad (19)$$

графічна інтерпретація яких наведена на рис. 7.

Характерним для означених моделей є те, що рівень як одноразового статичного (1 серія), так і малоциклових повторних навантажень (2 і 3 серія) виявився малозначимим при визначенні цього параметру. При цьому, якщо середні віддалі між похилими тріщинами у 1 і 2 серіях є, практично, однакові (0,55 і 0,56), то при малоцикловому знакопостійному навантаженні у 3 серії цей параметр зменшується на 32 % у зв'язку з більшою концентрацією силового потоку стискаючих і розтягуючих напружень.

хунку їх несучої здатності, вдосконалення чинних нормативних документів.

Висновки

В ході аналізу викладеного матеріалу можна відмітити наступні положення.

1. Стосовно несучої здатності зразків встановлено, що при знакопостійному малоцикловому навантаженні середнє значення міцності приопорних ділянок дослідних зразків зменшується на 8,2 % порівняно з несучою здатністю балок першої серії, випробуваних без повторного навантаження, а при знакозмінному циклічному навантаженні – на 18,4 %.

2. Практичне значення математичних моделей (8)...(10) полягає у більш-менш точному визначенні довжини проекції небезпечної похилої тріщини, яка перетинається зі стержнями поперечної арматури і яка приймає безпосередню участь у сприйнятті поперечної сили, що знайде своє відображення в уточненій авторами інженерній методиці розрахунку міцності приопорних ділянок дослідних елементів.

3. Представлені в моделях (11)...(13) дані про кути нахилу небезпечних похилих тріщин мають практичне значення при вдосконаленні інженерних методів розрахунку міцності похилих перерізів прогінних залізобетонних конструкцій, зокрема тих, що базуються на фермовій аналогії.

4. Представлені моделі (14)...(16) разом з виразом (4) можна використати для уточнення деформацій розтягнутої арматури і бетону, а також коефіцієнта ψ_s , який урахує сумісну роботу розтягнутої арматури і бетону.

Наукова новизна та практична значимість

Проведені експериментальні дослідження та аналіз їхніх результатів дозволили розкрити нові особливості характеру деформування, тріщиноутворення та руйнування дослідних зразків балок, що зазнають дії циклічних знакозмінних та знакопостійних навантажень, виявити механізм та нові схеми руйнування цих елементів, а також встановити їх залежність від відповідного співвідношення дослідних факторів.

Результатом досліджень у вказаному напрямку стане вдосконалений авторами загальний інженерний метод розрахунку міцності похилих і нормальних перерізів залізобетонних конструкцій при малоцикловому знакозмінному і знакопостійному навантаженні високих рівнів, який базуватиметься на виборі найбільш імовірних схем руйнування у залежності від реального співвідношення дослідних факторів, а також розвиток деформаційної моделі розра-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

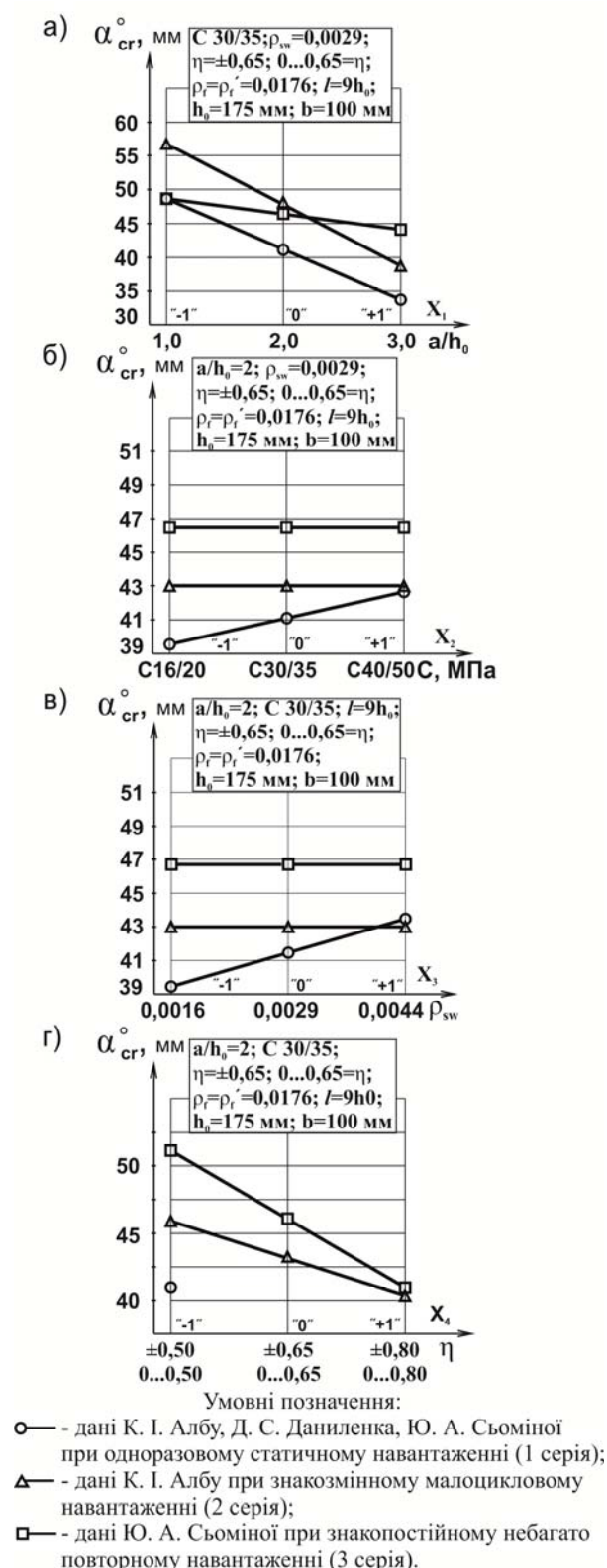


Рис. 5. Вплив величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г) на кут нахилу небезпечної похилої тріщини до поздовжньої осі елемента

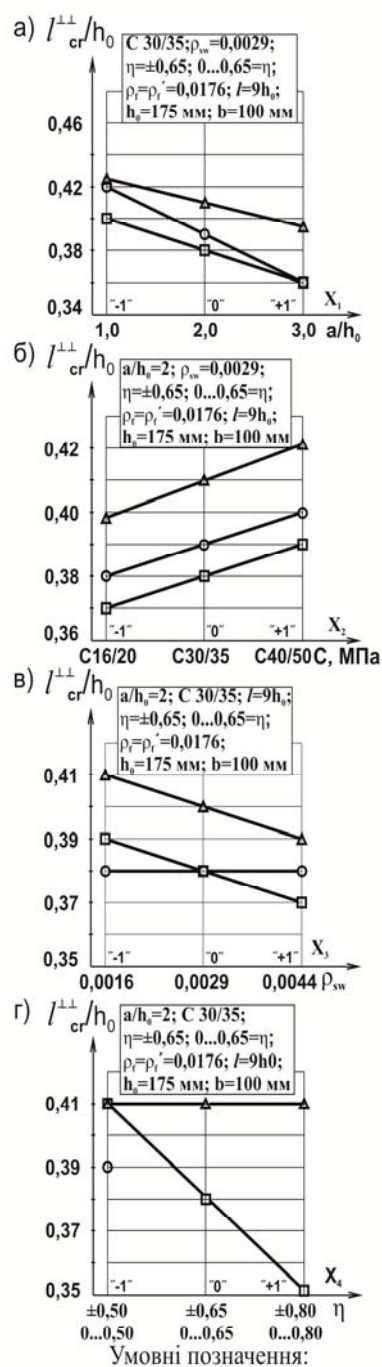


Рис. 6. Залежність відносної відстані між нормальними тріщинами в зоні чистого згину від величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

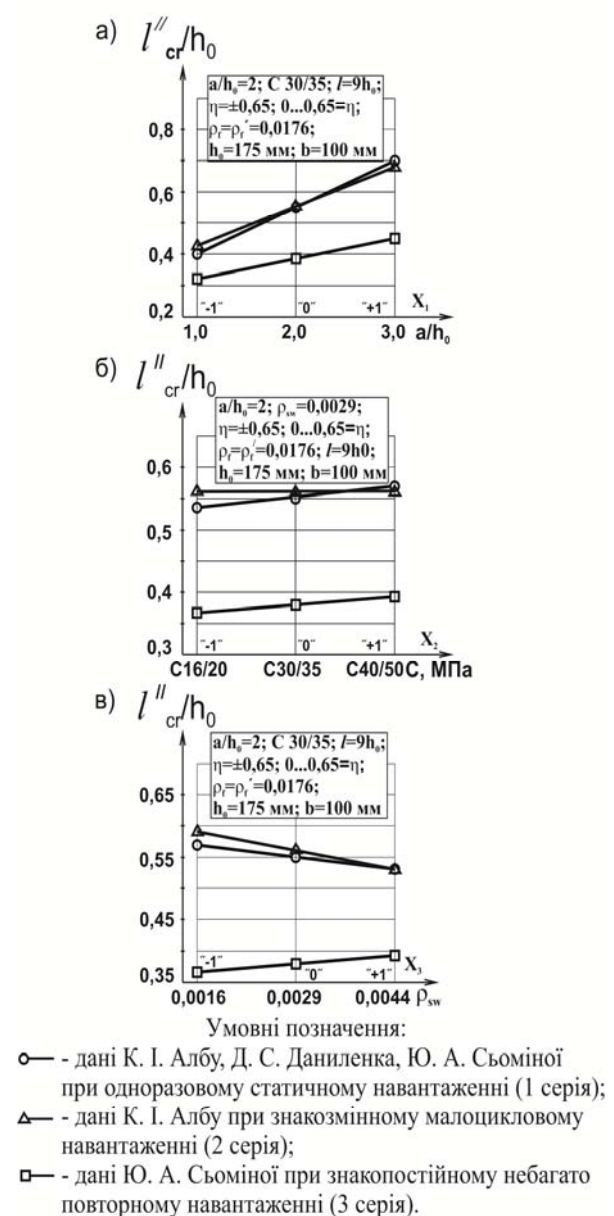


Рис. 7. Вплив величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в) на величину відносної віддалі між похилими тріщинами на приоприоних ділянках дослідних зразків

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабич, Є. М. Робота і розрахунок несучої здатності згинальних залізобетонних елементів таврового профілю при дії повторних навантажень [Текст] / Є. М. Бабич, П. С. Гомон, С. В. Філіпчук. — Рівне : НУВГП, — 2012. — 108 с.
2. Бабич, В. Є. Особливості роботи нерозрізних залізобетонних балок при повторних навантаженнях [Текст] / В. Є. Бабич // Будівельні конструкції : зб. наук. праць. — Київ : НДІБК, 2003. — Вип. 58. — С. 8-13.

3. Болошенко, Ю. Г. Расчёт прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, на основе трансформированных диаграмм деформирования бетона [Текст] / Ю. Г. Болошенко // Науково-технічне та організаційно-економічне сприяння реформам у будівництві та житлово-комунальному господарстві : збірник III Міжнародної конференції. — Макіївка : ДонНАСА, 2012. — Ч. 1. — С. 16-18.
4. Герб, П. І. Вплив повторних навантажень на міцність, деформативність та тріщиностійкість підсиленних у розтягнутій зоні залізобетонних балок із бетонів на відходах збагачення залізних руд [Текст] / П. І. Герб, О. І. Валоной // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. пр. — Кривий Ріг : КТУ, 2010. — Вип. 25. — С. 87-92.
5. Гомон, П. С. Робота згинальних залізобетонних елементів таврового перерізу за дії повторного навантаження [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Гомон Петро Святославович ; НУ «Львівська політехніка». — Львів, 2013. — 20 с.
6. Дорофеев, В. С. Прочность, трещиностойкость и деформативность предварительно напряжённых тавровых железобетонных элементов [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Ф. Р. Карпюк. — Одесса : Эвен, 2010. — 223 с. : ил. — ISBN 978-966-8169-43-4.
7. Дорофеев, В. С. Прочность, деформативность и трещиностойкость приоприонных участков внецентренно растянутых и сжатых железобетонных балок [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Н. Н. Петров. — Одесса : Эвен, 2011. — 183 с. : граф. — ISBN 978-966-8169-49-9.
8. Дробишинець, С. Я. Робота сталефібробетонних та сталефіброзалізобетонних балок при одноразовому та повторних малоциклових навантаженнях [Текст] / С. Я. Дробишинець, Є. М. Бабич // Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація : зб. наук. праць — Кривий Ріг : КТУ, 2004. — Вип. 6. — С. 65-71.
9. Залесов, А. С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил [Текст] / А. С. Залесов, Ю. А. Климов. — Киев : Будівельник, 1989. — 104 с.
10. Заречанський, О. О. Особливості роботи стиснуто-зігнутих залізобетонних елементів при одноразових і повторних малоциклових навантаженнях [Текст] : атореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Заречанський Олег Олегович ; НУ «Львівська політехніка». — Львів, 2008. — 20 с.
11. Зінчук, М. С. Міцність та деформативність залізобетонних згинальних елементів за малоциклових навантажень в умовах підвищених тем-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- ператур [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Зінчук Микола Степанович ; НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2008. – 18 с.
12. Караван, В. В. Результати експериментальних досліджень тріщиностійкості і деформативності згинальних залізобетонних елементів під дією малоциклових знакозмінних навантажень [Текст] / В. В. Караван // Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація : зб. наук. праць – Кривий Ріг : КТУ, 2002. – Вип. 5. – С. 168-172.
 13. Карапетян, С. Х. Міцність і стійкість позациентрово стиснутих залізобетонних стержнів в умовах небагаторазово повторних навантажень [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Карапетян Смбат Хачатурович ; ДП НДІБК. – Київ, 2009. – 20 с.
 14. Карпенко, Н. И. Методика расчёта параметров деформирования бетона при разгрузке с напряжений сжатия [Текст] / Н. И. Карпенко, В. А. Ерышев, Е. В. Латышева // Вестник МГСУ. – Москва, 2014. – Вып. №3. – С. 168-178.
 15. Карпюк, В. М. Розрахункові моделі прогінних залізобетонних конструкцій при складному напружено-деформованому стані приопорних ділянок [Текст] : дис. д-ра техн. наук : 05.23.01 / Карпюк Василь Михайлович ; Одеська держ. ак. буд-ва та арх.-ри. – Одеса, 2012. – 365 с. – Бібліогр. : С. 284-326.
 16. Карпюк, В. М. Розрахункові моделі силового опору прогінних залізобетонних конструкцій у загальному випадку напруженого стану (монографія) [Текст] / В. М. Карпюк – Одеса: ОДАБА, 2014. – 352 с. зіл. – ISBN № 978-617-7195-08-4.
 17. Карпюк, В. М. Методика експериментальних досліджень напружено-деформованого стану приопорних участків залізобетонних балок при малоцикловому навантаженні [Текст] / В. М. Карпюк, Е. И. Албу, Ю. А. Сёмина, А. К. Кицак // (28.11.2013) Сб. мат-в V Республ. научно-техн. конф. – Бендеры : Бендерский ПФ ГОУ «ПГУ им. Т. Г. Шевченка». – С. 3-10.
 18. Ковальчик, І. Я. Дослідження тріщиностійкості попередньо напружених залізобетонних балок при дії малоциклових навантажень [Текст] / І. Я. Ковальчик, П. М. Коваль // Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей : наук. нотатки. – Луцьк, 2014. – № 45. – С. 282-287.
 19. Корнійчук, О. І. Міцність та тріщиностійкість похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Корнійчук Олександр Іванович ; Полт. НТУ імені Юрія Кондратюка. – Полтава, 2009. – 21 с.
 20. Лучко, Й. Й. Температурні поля та напружений стан залізобетонних балкових конструкцій мостів [Текст] / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса, 2013. Вип. № 49. – С. 221-236.
 21. Масюк, Г. Х. Напружено-деформований стан похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів, що зазнають дії малоциклових знакозмінних навантажень [Текст] / Г. Х. Масюк, О. І. Корнійчук // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2008. – Вип. 17. – С. 204-211.
 22. Мирсаяпов, И. Т. Выносливость железобетонных конструкций при действии поперечных сил [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Мирсаяпов Илшлат Талгатович ; – Казань : КГАСУ, 2009. – 38 с.
 23. Пецольд, Т. М. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчёта и конструирования [Текст] / Т. М. Пецольд, В. В. Тур – Брест : БГТУ, 2003. – 379 с.
 24. Aslani F. Stress-strain model for concrete under cyclic loading / F. Aslani, R. Jowkarmeimandi // Magazine of Concrete Research. – Wollongong, Australia, 2012. – Vol. 64, Issue 8. – Pp. 673-685.
 25. Trapko W. The bearing capacity of reinforced concrete elements under repeated compressive load, reinforced with carbon strips / W. Trapko, T. Trapko // Civil engineering and management: scientific magazine. – Wrocław, Poland, 2012. – Vol. 4. – Pp. – 590-597.
 26. Dorofeev V. Their capacity steel cross-section eccentrically shrink or stretch beams / V. Dorofeev, V. Karpyuk, N. Petrov // Materials of 18 Conference «Theoretical Foundations of Civil Engineering», Polish – Ukrainian – Lithuanian Transactions – Warsaw, September, 2010. – P. 345-352.

В. С. ДОРОФЕЕВ¹, В. М. КАРПЮК², Е. И. АЛБУ³, Ю. А. СЁМИНА^{4*}

¹ Кафедра «Железобетонные и каменные конструкции», Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (048) 729 86 20, эл. почта dorvs@ukr.net

² Кафедра «Железобетонные и каменные конструкции», Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (067) 486 56 74, эл. почта v.karpiuk@ukr.net

³ Кафедра «Железобетонные и каменные конструкции», Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (67) 188 82 43, эл. почта alby_katj@mail.ru

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

^{4*} Кафедра «Железобетонные и каменные конструкции», Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (093) 551 32 80, эл. почта syomina3091@mail.ru

ПРОЧНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАЛОЦИКЛОВЫХ ЗНАКОПОСТОЯННЫХ И ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЖЕНИЙ ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ

Цель. Исследовать и проанализировать поведение приопорных участков железобетонных балочных элементов при воздействии малоцикловых знакопостоянных и знакопеременных нагрузжений с учётом конструктивных факторов и факторов внешнего воздействия для дальнейшего использования полученных результатов при усовершенствовании инженерной методики их расчёта. **Методика.** Для изучения данной проблемы выполнено 3 серии экспериментальных исследований. Опытные образцы – это железобетонные балки прямоугольного сечения с размерами 200×100 мм, длиной 1975 мм, армированные двумя плоскими сварными каркасами с симметрично расположенной нижней и верхней арматурой 2Ø14A500C и поперечной 2Ø3, 4, 5ВрІ с относительными пролётами среза $a/h_0 = 1, 2, 3$, изготовленные из тяжелого бетона классов C 16/20, C 30/35, C 40/50 и испытанные кратковременным статическим, малоцикловым знакопеременным ($\eta = \pm 0,50; \pm 0,65; \pm 0,80$) и циклическим знакопостоянным ($\eta = 0 \dots 0,50; 0 \dots 0,65; 0 \dots 0,85$) нагружениями.

Результаты. В приведенном материале рассматриваются и анализируются полученные и обработанные экспериментальные данные, которые раскрывают влияние малоцикловых знакопостоянных и знакопеременных нагрузок высоких уровней на основные показатели трещиностойкости и прочности наклонных и нормальных сечений приопорных участков пролетных железобетонных конструкций, учитывая изменение принятых при планировании эксперимента конструктивных факторов и факторов внешнего воздействия.

Научная новизна. В статье приведены систематизированные опытные данные, которые отражают новые особенности работы железобетонных балочных элементов при воздействии нагрузок указанных видов.

Практическая значимость. Результаты исследований по выбранной теме внедряются в практику проектирования и расчётов приопорных участков пролетных железобетонных элементов, которые подвергаются воздействию малоцикловых нагрузжений, а также могут быть использованы в учебном процессе ВУЗов технического профиля.

Ключевые слова: малоцикловая знакопеременная нагрузка; циклическое знакопостоянное нагружение; прочность; трещиностойкость; математическая модель; железобетонная балка

V. S. DOROFEEV¹, V. M. KARPIUK², E. I. ALBU³, YU. A. SOMINA^{4*}

¹ Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Odessa State Academy of Building and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (048) 729 86 20, e-mail dorvs@ukr.net

² Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Odessa State Academy of Building and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (067) 486 56 74, e-mail v.karpiuk@ukr.net

³ Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Odessa State Academy of Building and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (67) 188 82 43, e-mail alby_katj@mail.ru

^{4*} Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Odessa State Academy of Building and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (093) 551 32 80, e-mail syomina3091@mail.ru

STRENGTH AND CRACK RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAM STRUCTURES UNDER THE ACTION OF LOW-CYCLE LOADS OF CONSTANT SIGN AND CYCLIC ALTERNATING LOADINGS OF HIGH LEVELS

Purpose. To investigate and to analyze the behavior of the areas near supports of reinforced concrete beam elements under the action of low-cycle loads of constant sign and repeated alternating loadings taking into account the influence of constructive factors and factors of external action for the future using of obtained results for improvement of calculated engineering technique. **Methodology.** Three series of experiments were performed to research this problem. Test specimens are reinforced concrete beams of rectangular cross section with sizes 200×100 mm,

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

with length 1975 mm, that were reinforced with two flat welded framework with symmetrically located top and bottom longitudinal reinforcement 2Ø14A500C and transverse reinforcement 2Ø3, 4, 5BpI with relative shear span $a/h_0 = 1, 2, 3$, that were made from concrete C 16/20, C 30/35, C 40/50, and that were tested by monotonic load, low-cycle alternating loading ($\eta = \pm 0,50; \pm 0,65; \pm 0,80$) and repeated load of constant sign ($\eta = 0 \dots 0,50; 0 \dots 0,65; 0 \dots 0,85$). **Findings.** This material considers and analyses obtained and processed experimental data, that discover the influence of low-cycle loads of constant sign and repeated alternating loadings of high levels on the main proofs of crack resistance and strength of inclined and vertical sections of areas near supports of reinforced concrete structures taking into account the change of selected by planning of an experiment constructive factors and factors of external action. **Originality.** In this paper the systematized experimental data are given, that reflect new features of reinforced concrete beam elements work under the action of mentioned loads. **Practical value.** The research results are being introduced to the practice of design and calculations of areas near supports of reinforced concrete elements that are subjected to the action of low-cycle loads, and also the results can be used in educational process of technical academies.

Keywords: low-cycle alternating load; repeated loading of constant sign; strength; crack resistance; mathematical model; reinforced concrete beam

REFERENCES

1. Babych Ye. M., Gomon P.S., Filipchuk S.V. *Robota i rozrakhunok nesuchoi zdutnosti zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv tavrovoho profilu pry dii povtornykh navantazhen* [Work and calculation of the bearing capacity of bending T-sections reinforced concrete elements under the influence of repeated loads]. Rivne, NUWMNR, 2012. 108 p.
2. Babych V. Ye. Osoblyvosti roboty nerozriznykh zalizobetonnykh balok pry povtornykh navantazhenniakh [Features of the work of continuous reinforced concrete beams under repeated loads]. *Zbirnyk naukovykh prats "Budivelni konstruktii"* [Collection of scientific works "Building structures"], 2003, issue 58, pp. 8-13.
3. Boloshenko Ju. G. Raschjot prochnosti normal'nyh sechenij izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov, usilennyh narashhivaniem szhatoj zony, na osnove transformirovannykh diagramm deformirovanija betona [Strength calculation of vertical sections of bending reinforced concrete elements reinforced by increasing of compression area on the base of transformed diagrams of concrete deformation]. *Zbirnyk III Mizhnarodnoi konferentsii "Naukovo-tekhniczne ta orhanizatsiino-ekonomichne spryannia reformam u budivnytstvi ta zhytlovo-komunalnomu hospodarstvi"* [Collection of the III International Conf. "Scientific and technical, organizational and economic assistance to the reforms in building and utilities]. Makiivka, DonNASA Publ., 2012, Part 1, pp. 16-18.
4. Herb P. I. Vplyv povtornykh navantazhen na mitsnist, deformatyvnist ta trishchynostiikist pidsylenykh u roztrahnutii zoni zalizobetonnykh balok iz betoniv na vidkhodakh zbahachennia zaliznykh rud [The influence of repeated loads on the strength, deformability and crack resistance of reinforced concrete beams reinforced in tensile area from concretes with wastes of iron ores enrichment]. *Visnyk Kryvorizkoho tekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Technical University of Krivoy Rog], 2010, issue 25, pp. 87-92.
5. Homon P. S. *Robota zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv tavrovoho pererizu za dii povtornoho navantazhennia*. Avtoreferat Diss. [Work of flexible T-section reinforced concrete elements under the influence of repeated loading. Author's abstract.]. Lviv, 2013. 20 p.
6. Dorofeev V. S., Karpiuk V. M., Karpiuk F. R. *Prochnost, treshhinostojkost i deformativnost predvaritelno naprjazhjonnykh tavrovyyh zhelezobetonnykh elementov* [The strength, crack resistance and deformability of prestressed T-sections reinforced concrete elements]. Odessa, Jeven Publ., 2010. 223 p.
7. Dorofeev V. S., Karpiuk V. M., Petrov N. N. *Prochnost, deformativnost i treshhinostojkost priopornykh uchastkov vnecentrenno rastjanutyh i szhatykh zhelezobetonnykh balok* [The strength, deformability and crack resistance of an areas near supports of eccentrically tensioned and eccentrically compressed reinforced concrete beams]. Odessa, Jeven Publ., 2011. 183 p.
8. Drobyshynets S. Ya., Babych Ye. M. *Robota stalefibrobetonnykh ta stalefibrozalizobetonnykh balok pry odnorazovomu ta povtornykh malotsyk-lovykh navantazhenniakh* [The work of steel fiber concrete and steel fiber reinforced concrete beams under monotonic loadings and repeated low-cycle loads]. *Zb. nauk. pr. "Stalezalizobetonni konstruktii: doslidzhennia, proektuvannia, budivnytstvo, ekspluatatsiia"* [Proc. "Steel reinforced concrete structures: research, design, building, exploitation], 2004, issue 6, pp. 65-71.
9. Zalesov A. S., Klimov Yu. A. *Prochnost zhelezobetonnykh konstrukcij pri dejstvii poperechnykh sil* [The strength of reinforced concrete structures under the action of shear forces]. Kiev, Budivelnik Publ., 1989. 104 p.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

10. Zarechanskyi O. O. *Osoblyvosti roboty stysnuto-zihnutykh zalizobetonnykh elementiv pry odnorazovykh i povtornykh malotsyklovykh navantazhenniakh*. Atoreferat Diss. [Features of compressed-bent reinforced concrete elements under single and repeated low-cycle loads. Author's abstract.]. Liviv, 2008. 20 p.
11. Zinchuk M. S. Mitsnist ta deformatyvnist zalizobetonnykh zghynalnykh elementiv za malotsyklovykh navantazhen v umovakh pidvyshchennykh temperature. Atoreferat Diss. [The strength and deformability of reinforced concrete bent elements under low-cycle loads at elevated temperatures. Author's abstract.]. Liviv, 2008. 18 p.
12. Karavan V. V. Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen trishchynostiikosti i deformatyvnosti zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv pid diieiu malotsyklovykh znakovminnykh navantazhen [The results of the researches of crack resistance and deformability of bending reinforced concrete elements under the action of low-cycle alternating loadings]. *Zb. nauk. pr. "Stalezalizobetonni konstruksii: doslidzhennia, proektuvannia, budivnytstvo, ekspluatatsiia"* [Proc. "Steel reinforced concrete structures: research, design, building, exploitation"], 2002, issue 5, pp. 168-172.
13. Karapetian S. Kh. Mitsnist i stiikist pozatsentrovo stysnutykh zalizobetonnykh sterzhniv v umovakh nebahatorazovo povtornykh navantazhen. Atoreferat Diss. [The strength and fixity of eccentrically compressed bars under repeated loads. Author's abstract.]. Kyiv, 2009. 20 p.
14. Karpenko N. I., Eryshev V. A., Latysheva E. V. Metodika raschjota parametrov deformirovaniia betona pri razgruzke s naprjazhenij szhatija [Calculation methods of parameters of concrete deformation at reloading from compression stress]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of Moscow State Building University], 2014, issue 3, pp. 168-178.
15. Karpiuk V. M. *Rozrakhunkovi modeli prohinnykh zalizobetonnykh konstruksii pry skladnomu napruzhenno-deformovanomu stani pryopornykh dilianok*. Dokt. Diss. [Calculation models of span reinforced concrete structures at complex stress-strain state of areas near supports. Dokt. Diss.]. Odesa, 2012. 365 p.
16. Karpiuk V. M. *Rozrakhunkovi modeli sylovoho oporu prohinnykh zalizobetonnykh konstruksii u zahalnomu vypadku napruzhenoho stanu* [Calculation models of power resistance of span reinforced concrete constructions in general case of stress state]. Odesa, ODABA Publ., 2014. 352 p.
17. Karpiuk V. M., Albu E. I., Somina Yu. A., A. K. Kitsak Metodika eksperimentalnykh issledovanij naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniia priopornykh uchastkov zhelezobetonnykh balok pri malociklovom nagrazhenii [Methodology of research of stress-strain state of areas near support of reinforced concrete beams under low-cycle load]. *Tezisy V Respubl. nauchno-tehn. konf. "Stroitelstvo - kak faktor formirovaniia komfortnoj sredy zhiznedeiatelnosti"* [Proc. of the V Republican Scientific and Technical Conf. "Building is a factor of comfortable environment and life activity formation"]. Bendery, 2013, pp. 3-10.
18. Kovalchuk I. Ya., Koval P. M. Doslidzhennia trishchynostiikosti poperedno napruzhenykh zalizobetonnykh balok pry dii malotsyklovykh navantazhenniakh [The research of crack resistance of prestressed reinforced concrete beams under the action of low-cycle loads]. *Nauk. notatky "Naukovo-prykadni aspekty avtomobilnoi i transportno-dorozhnoi haluzei"* [Scientific notations "Scientific and Practical aspects of automobile, transport and traffic branches"], 2014, issue 45, p. 282-287.
19. Kornichuk O. I. Mitsnist ta trishchynostiikist pokhylykh pereriziv zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv pry dii malotsyklovykh znakovminnykh navantazhen. Avtoreferat Diss. [Strength and crack resistance of inclined sections of flexible reinforced concrete elements under the influence of low-cycle alternating loads. Author's abstract.]. Poltava, 2009. 21 p.
20. Luchko Y. Y., Kovalchuk V. V. Temperaturni polia ta napruzheni stan zalizobetonnykh balkovykh konstruksii mostiv [Temperature fields and stress state of reinforced concrete beam structures of bridges]. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Odessa State Academy of Building and Architecture], 2013, issue 49, p. 221-236.
21. Masiuk H. Kh., Kornichuk O. I. Napruzhenno-deformovanyi stan pokhylykh pereriziv zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv, shcho zaznaiut dii malotsyklovykh znakovminnykh navantazhen [Stress - strain state of incline sections of bending concrete elements that are exposed to the action of low-cycle alternating loads]. *Zb. nauk. prats "Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy"* [Proc. "Resource saving materials, constructions, buildings and structured"], 2008, issue 17, pp. 204-211.
22. Mirsajapov I. T. *Vynoslivost zhelezobetonnykh konstrukcij pri dejstvii poperechnykh sil*. Dokt. Diss. [Endurance of reinforced concrete structures under the action of share forces. Doct. Diss.]. Kazan, 2009. 38 p.
23. Pecold T. M., Tur V. V. *Zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovy teorii, raschjota i konstruirovaniia* [Reinforced concrete structures. The basic of theory, calculations and design]. Brest, BGTU Publ., 2003. 379 p.
24. Aslani F., Jowkarmeidandi R. Stress-strain model for concrete under cyclic loading. *Magazine of Concrete Research of Wollongong (Australia)*, 2012, issue 8, pp. 673-685.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

25. Trapko W., Trapko T. The bearing capacity of reinforced concrete elements under repeated compressive load, reinforced with carbon strips. *Scientific magazine "Civil engineering and management"*, Wroclaw, Poland, 2012, issue 4, pp. 590-597.
26. Dorofeev V., Karpyuk V., Petrov N. Their capacity steel cross-section eccentrically shrink or stretch beams. *Materials of 18 Conference "Theoretical Foundations of Civil Engineering"*, Polish – Ukrainian – Lithuanian Transactions – Warsaw, September, 2010, pp. 345-352.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. К. В. Єгуповим (Україна), д.т.н., проф. А. В. Радкевичем (Україна).

Надійшла до редколегії 11.08.2016.

Прийнята до друку 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.072.2.012.45.014:006.015.2

Ю. П. КИТОВ¹, Г. Л. ВАТУЛЯ², М. А. ВЕРЕВИЧЕВА³, С. В. ДЕРИЗЕМЛЯ^{4*}

¹ Кафедра «Строительная механика и гидравлика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха 7, Харьков, Украина, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, эл. почта budmekh@ukr.net

² Кафедра «Строительная механика и гидравлика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха 7, Харьков, Украина, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, эл. почта vatulya@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-3823-7201

³ Кафедра «Строительная механика и гидравлика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха 7, Харьков, Украина, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, эл. почта budmekh@ukr.net

^{4*} Кафедра «Строительная механика и гидравлика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха 7, Харьков, Украина, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, эл. почта s.deryzemlia@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-6556-4454

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ СЕЧЕНИЙ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

Цель. Целью предлагаемой статьи является определение оптимальных с точки зрения стоимости и прочности формы и размеров комбинированного сечения с учетом характеристик составляющих материалов. **Методика.** Численные исследования комбинированных равнопрочных сечений, основанные на свойствах приведенных сечений, составляющих материалов и результатах экспериментальных данных различных авторов. **Результаты.** На основании сортамента стальных двутавров был выполнен расчет и подбор комбинированного двутаврового сечения, у которого верхняя полка заменена на тонкостенное стальное «корыто», заполненное бетоном, и его сравнение с двутавровым сечением, усиленным бетонной плитой. Для достижения условия равнопрочности подбираются высота и ширина бетонной плиты. Показано, что наиболее выгодным с точки зрения стоимости является тавровое стальное сечение с верхней полкой в виде тонкостенного стального «корыта» с бетонной плитой. **Научная новизна.** В результате выполненных расчетов, на основании условия равнопрочности, выбраны оптимальные вид и размеры сталебетонного сечения, обеспечивающие наименьшую стоимость. **Практическая значимость.** В настоящее время сталежелезобетонные конструкции все чаще используются в строительстве. Это связано с тем, что они имеют меньший по сравнению с железобетоном собственный вес, а также их стальная часть может использоваться в качестве несъемной опалубки. Усовершенствование таких конструкций приводит к повышению прочностных характеристик и снижению стоимости.

Ключевые слова: сталебетон; приведенное сечение; равнопрочное сечение; сталежелезобетонная балка; изгибающий момент

Введение

Вопросы повышения несущей способности строительных конструкций, экономии бетона и стали оказывают значительное влияние при строительстве новых и реконструкции существующих зданий и сооружений, в том числе транспортных. Наряду с совершенствованием традиционных железобетонных конструкций большое внимание уделяется использованию конструкций с внешним армированием стальным листом, профилем или замкнутой обоймой, т.е. сталебетонных или сталежелезобетонных конструкций. В настоящее время такие конструкции находят широкое применение при

реализации в строительстве сооружений различных видов систем (колонн, балок, ферм, арок, комбинированных систем) [1-3]. Элементы этих систем испытывают различные виды напряженно-деформированного состояния – центральное растяжение и сжатие, внецентренное сжатие, сжатие с изгибом, продольные изгибы.

Обзор исследований и цель работы

В ряде работ [4-6] изучаются комбинированные сечения, однако выбор размеров этих сечений и их преимущества перед другими не обосновываются.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

В работах [5, 13] предлагается использовать сталежелезобетонные конструкции с сечением в виде симметричных стальных профилей, заполненных бетоном. Однако прочность таких сечений ниже прочности используемых стальных профилей [8]. В связи с этим возникает задача выбора формы и размеров комбинированного сечения с учетом характеристик составляющих материалов.

Материалы сталебетонных конструкций имеют, с одной стороны, различные физико-механические характеристики, с другой стороны – различные стоимости. Например, бетон работает преимущественно на сжатие, значит его надо располагать в сжатой зоне сечения; сталь одинаково воспринимает и растяжение, и сжатие, поэтому основную ее массу естественно сосредотачивать в растянутой зоне; механические характеристики сопротивления деформации и разрушению у стали значительно выше, чем у бетона, а это значит, что бетона в составе конструкции должно быть больше, чем стали; вес бетонной конструкции больше, чем стальной; стоимость бетона меньше, чем стали, и т.д.

На рис. 1 показаны два варианта составного сечения сталежелезобетонной балки, работающей на изгиб. На основании анализа работ [6, 7] с предложениями по усилению стальных стержней бетоном, в статье [8] приведены обоснования того, что эффективным усилением при восприятии деформации при изгибе является расположение плиты в сжатой зоне двутаврового сечения (см. рис. 1, б). Такая форма сечения приемлема при реконструкции сооружения для его усиления.

Во вновь проектируемых сталежелезобетонных конструкциях форма и размеры элементов сечения должны выбираться в соответствии с указанными выше особенностями НДС составного сечения.

Поэтому в предлагаемом рациональном сечении (см. рис. 1, а) верхняя (сжатая) полка стального двутавра, в которой нет необходимости для восприятия сжимающих напряжений, отбрасывается и заменяется тонкостенным «корытом». Это «корыто», во-первых, и в основном, необходимо для обеспечения совместной работы бетонной плиты и стального нижнего пояса сечения, во-вторых, целесообразно для использования в качестве опалубки плиты.

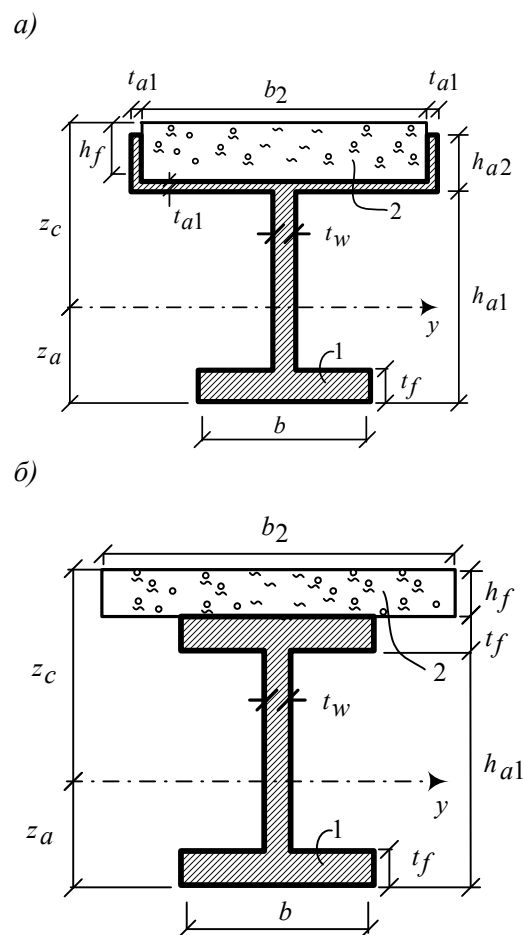


Рис. 1. Поперечное сечение сталежелезобетонной балки:

- а) – тонкостенного «корыта» с бетонной плитой;
б) – прокатного профиля (1) с железобетонной плитой (2)

Общие положения

Чтобы сечение было рациональным, необходимо учесть одно из требований оптимальности конструкции – равнопрочность. Равнопрочность для сечения означает, что напряжения в наиболее удаленных от нейтральной оси волокнах одновременно достигают предельных значений. Для бетона это $\sigma_c = f_{cd}$ в сжатых волокнах, в стали – $\sigma_a = f_{yd}$ в растянутых волокнах.

Положение нейтральной оси определим, используя метод приведенного сечения [9]. Суммарная осевая сила, действующая в поперечном сечении, должна быть равна нулю, то есть

$$\int \sigma_a dA + \int \sigma_c dA = 0. \quad (1)$$

При изгибе

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$\sigma_a = \frac{E_a z}{\rho}, \quad \sigma_c = \frac{E_c z}{\rho}, \quad (2)$$

где E_a , E_c – модули упругости стали и бетона.

Подставив (2) в (1), получим

$$\int z dA + n \int z dA = 0, \quad (3)$$

где $n = E_c / E_a$.

Определение наибольшего изгибающего момента

Согласно уравнению изогнутой оси, наибольший расчетный изгибающий момент M_{Ed} определяется выражением

$$M_{Ed} = \frac{\gamma_{M0} f_{yd} J_{np}}{z_a}. \quad (4)$$

$$z_a = \frac{\frac{bh_f^2}{2} + \frac{h_{a1}^2 - t_f^2}{2} t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} \left(h_{a1} + \frac{t_{a1}}{2} \right)}{bt_f + (h_{a1} - t_f) t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} + 2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f} +$$

$$+ \frac{2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} \left(h_{a1} + \frac{h_{a2} + t_{a1}}{2} \right) + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f \left(h_{a1} + t_{a1} + \frac{h_f}{2} \right)}{bt_f + (h_{a1} - t_f) t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} + 2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f} \quad (6)$$

Здесь в наиболее удаленных от нейтральной оси волокна возникают наибольшие напряжения, которые по условию прочности не должны превышать расчетных значений:

$$\sigma_{a \max} = \frac{M_{Ed} z_a}{J_{np}} \leq \gamma_{M0} f_{yd}, \quad (7)$$

$$\sigma_{c \max} = \frac{E_c}{E_a} \sigma_{np \max} = \frac{E_c}{E_a} \frac{M_{Ed} z_c}{J_{np}} \leq f_{cd}, \quad (8)$$

где γ_{M0} – коэффициент надежности стали; J_{np} – момент инерции приведенного сечения.

Чтобы сечение было равнопрочным и, следовательно, оптимальным, условия прочности бетона и стали при одном и том же изгибающем моменте M_{Ed} должны выполняться в виде равенств. Отсюда имеем:

Момент инерции приведенного сечения определяется формулой

$$J_{np} = J_a + \frac{E_c}{E_a} J_c, \quad (5)$$

где J_a , J_c – моменты инерции стальной и бетонной части сечения относительно нейтральной оси сечения.

Сечение с верхней полкой в виде тонкостенного «корыта» с бетонной плитой

Подставив в условие (3) подинтегральные выражения, в соответствии с рисунком (см. рис. 1, а), получим уравнение относительно z , решением которого является положение нейтральной оси z_a (6).

Расчетное сечение соответствует максимальному изгибающему моменту.

$$\frac{M_{Ed}}{J_{np}} = \frac{f_{cd}}{(E_c/E_a) z_c} = \frac{\gamma_{M0} f_{yd}}{z_a}. \quad (9)$$

Размеры отдельных элементов, составляющих сечение, должны находиться из условия постоянства соотношения расстояний до крайних волокон бетона и стали от нейтральной оси:

$$\frac{z_c}{z_a} = \frac{f_{cd}}{(E_c/E_a) \gamma_{M0} f_{yd}}. \quad (10)$$

Из рисунка (см. рис. 1, а) видно, что

$$z_c = h_{a1} + h_f + t_{a1} - z_a. \quad (11)$$

Из (10) и (11) находим

$$z_a = \frac{(h_{a1} + h_f + t_{a1})(E_c/E_a) \gamma_{M0} f_{yd}}{f_{cd} + (E_c/E_a) \gamma_{M0} f_{yd}}. \quad (12)$$

Уравнение для определения оптимальных размеров составного сечения получаем, при-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

равнивая правые части условия равнопрочности (12) и выражения (6) для нейтральной оси:

$$\frac{\frac{bh_f^2}{2} + \frac{h_{a1}^2 - t_f^2}{2} t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} \left(h_{a1} + \frac{t_{a1}}{2} \right)}{bt_f + (h_{a1} - t_f) t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} + 2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f} +$$

$$\frac{2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} \left(h_{a1} + \frac{h_{a2} + t_{a1}}{2} \right) + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f \left(h_{a1} + t_{a1} + \frac{h_f}{2} \right)}{bt_f + (h_{a1} - t_f) t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} + 2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f} = \frac{(h_{a1} + h_f + t_{a1})(E_c/E_a) \gamma_{M0} f_{yd}}{f_{cd} + (E_c/E_a) \gamma_{M0} f_{yd}}. \quad (13)$$

Уравнение (13) решаем приближенно относительно размеров бетонной плиты b_2 и h_f (см. рис. 1, а). Для этого задаемся номером двутаврового сечения [10] и принимаем в качестве $b, t_f, t_w, h_{a1} = h - t_f$ размеры его элементов.

Так как уравнение (13) является нелинейным, можно получить различные сочетания b_2 и h_f равнопрочных сечений. Из них необходимо выбрать то, для которого $M_{\max} = M_{Ed}$, где $M_{\max}$ – максимальный изгибающий момент,

возникающий в балке от заданной внешней нагрузки.

Получив рациональные значения b_2 и h_f , находим значение расчетного изгибающего момента для этого сечения и сравниваем его с максимальным для балки. Если эти моменты не совпадают, меняем номер двутавра и производим перерасчет. Далее находим объемы материалов и стоимость погонного метра балки.

Для определения наибольшего изгибающего момента выразим моменты инерции стальной и бетонной составляющих сечения (см. рис. 1, а):

$$J_a = 2 \frac{t_{a1} (h_{a2} - t_{a1})^3}{12} + 2 \frac{t_{a1} (h_{a2} - t_{a1}) \cdot \left(h_{a1} + \frac{h_f + t_{a1}}{2} - z_a \right)^2}{12} + \frac{(b_2 + 2t_{a1}) \cdot t_{a1}^3}{12} +$$

$$+ \frac{(b_2 + 2t_{a1}) \cdot t_{a1} \left(h_{a1} + \frac{t_{a1}}{2} - z_a \right)^2}{12} + \frac{t_w (h_{a1} - t_f)^3}{12} + t_w (h_{a1} - t_f) \cdot \left(z_a - t_f - \frac{h_{a1} - t_f}{2} \right)^2 +$$

$$+ \frac{bt_f^3}{12} + bt_f \left(z_a - \frac{t_f}{2} \right)^2. \quad (14)$$

$$J_c = \frac{b_2 h_f^3}{12} + b_2 h_f \left(h_{a1} + \frac{h_f}{2} + t_{a1} - z_a \right)^2. \quad (15)$$

Зная моменты инерции (14), (15), найдем момент инерции приведенного сечения $J_{пр}$ (5) и наибольший изгибающий момент (4).

Стоимость погонного метра балки

Стоимость погонного метра балки определяется по формуле

$$C = V_a \gamma_a c_a + V_c \cdot c_c = (A_a \cdot 1) \gamma_a c_a + (A_c \cdot 1) \cdot c_c, \quad (16)$$

где c_a, c_c – стоимости погонного метра стали и бетона (грн/м³); V_c и A_c – объем погонного метра (м³) и площадь бетонной части поперечного сечения (м²); V_a и A_a – объем погонного метра (м³) и площадь стальной части поперечного сечения (м²).

Сравнение различных видов сечений

Произведем сравнительный анализ стоимости погонного метра балок с различными видами комбинированных сечений (двутавр с верхней полкой в виде «корыта» с бетонной плитой

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

и двутавр с верхней полкой, усиленной бетонной плитой), а также с сечением в виде стального широкополочного двутавра [10].

Рассмотрим двухопорную балку пролетом $l = 24$ м, загруженную равномерно распределенной нагрузкой $q = 1,7$ кН/м. Механические характеристики материалов: $f_{cd} = 30,5$ МПа, $\gamma_{M0} f_{yd} = 200$ МПа, $E_a = 2 \cdot 10^5$ МПа, $E_c = 4 \cdot 10^5$ МПа. Стоимости погонного метра стали и бетона $c_a = 18$ грн/м³, $c_c = 2500$ грн/м³.

Максимальный расчетный изгибающий момент для такой балки равен:

$$M_{\max} = ql^2 / 8 = 1224 \text{ кНм.}$$

Рассмотрим балку с поперечным сечением, соответствующим рисунку (см. рис. 1, а). Отыскиваем номер широкополочного двутавра, для которого расчетный момент M_{Ed} несколько меньше $M_{\max}$ при условии, что толщина бетонной плиты h_f не превышает 6 см. Получаем двутавр 60ШЗ [10], для которого: $W_y = 5273$ см³, $M_{Ed} = \gamma_{M0} f_{yd} W_y = 1054,6$ кНм.

Размеры стального профиля без верхней полки примем такими же, как у двутавра 60ШЗ: $b = 32$ см, $h_{a1} = h - t_f = 57,05$ см, $t_f = 2,45$ см, $t_w = 1,8$ см, размеры «корыта» принимаем равными: $t_{a1} = 0,5$ см, $h_{a2} = 5$ см.

Решая приближенно уравнение (11) относительно h_f при значениях b_2 в некотором диапазоне, например, 50...80 см, подберем сечение, для которого расчетный момент равен максимальному: $M_{Ed} = M_{\max}$. Получаем размеры $b_2 = 57,7$ см, $h_f = 12$ см (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики рационального сечения

b_2 , см	h_f , см	z_a , см	$J_{пр}$, см ⁴	M_{Ed} , кНм
50	16,5	42,0	274160	1305,1
55	13,5	40,3	252701	1253,7
57,7	12,0	39,5	241572	1224,4
60	11,0	38,9	234581	1206,3
65	9,5	38,0	225463	1185,3

Получим для двутаврового сечения, усиленного бетонной плитой (см. рис. 1, б) выражения, аналогичные (11)-(15), для определения положения нейтральной оси и наибольшего расчетного изгибающего момента. Проведем для этого сечения расчеты размеров равнопрочного сечения b_2, h_f , перебирая номера двутавров до выполнения условия $M_{Ed} \geq M_{\max}$. В результате получим двутавр 60ШЗ, $b_2 = 34$ см, $h_f = 23$ см, $M_{Ed} = 1234,1$ кНм.

В табл. 2 приведены сравнительные результаты, полученные для двух равнопрочных комбинированных сечений с различным усилением и для двутавра 70ШЗ, обеспечивающего прочность балки при изгибающем моменте $M = M_{\max}$ ($W_y = 7059$ см³). Стоимость погонного метра определяется согласно (16).

Таблица 2

Сравнение поперечных сечений

Вид усиления	b_2 , см	h_f , см	M_{Ed} , кНм	C , грн/м
Усиление в виде «корыта»	57,7	12,0	1224,4	3147,9
Усиление в виде плиты на верхней полке двутавра	34,0	23,0	1234,1	3292,3
Двутавр	70ШЗ		1411,8	4235,8

Как видно из таблицы (см. табл. 2), наименьшая стоимость имеет место для сечения, усиленного тонкостенным «корытом» с бетонной плитой.

Выводы

Предложены критерий оптимальности и метод выбора рационального поперечного сечения сталежелезобетонной балки. Рациональным считается сечение, обладающее свойством равнопрочности.

Показано, что наиболее выгодным с точки зрения стоимости является тавровое стальное сечение с верхней полкой в виде тонкостенного стального «корыта», заполненного бетоном (см. рис. 1, а).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ

1. Стороженко, Л. І. Сталезалізобетонні конструкції [Текст] : навчальний посібник / Л. І. Стороженко, О. В. Семко, В. Ф. Пенц. – Полтава, 2005. – 181 с.
2. Клименко, Ф. Е. Сталобетонные конструкции с внешним полосовым армированием [Текст] / Ф. Е. Клименко. – Київ : Будівельник, 1984. – 88 с.
3. Ватуля, Г. Л. Расчет и проектирование комбинированных и сталобетонных конструкций [Текст] : дисс. д-ра. техн. наук : 05.23.01 / Ватуля Глеб Леонидович ; Укр. гос. ун-т железнодорож. трансп. – Харків, 2015. – 430 с.
4. Стороженко, Л. І. Експериментальні дослідження балок двотаврового перерізу з верхніми залізобетонними полицями [Текст] / Л. І. Стороженко, О. І. Лапенко, О. Г. Горб // Зб. наук. праць «Галузеве машинобудування, будівництво». – Полтава : ПНТУ, 2009. – Вип. 24. – С. 85 - 90.
5. Стороженко, Л. І. Сталезалізобетонні балки із залізобетонним верхнім поясом [Текст] / Л. І. Стороженко, О. А. Крупченко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – № 662 : Теорія і практика будівництва. – С. 354-360.
6. Janguo, Nie. Experimental Studies on Shear Strength of Steel-Concrete Composite Beams / Janguo Nie, Yan Xiao, Lin Chen // Journal of Structural Engineering, 2004. – Vol 130. – № 8. – pp. 1206 – 1214.
7. Vasdravellis, George. Shear Strength and Moment-Shear Interaction in Steel-Concrete Composite Beams / George Vasdravellis, Brian Uy // Journal of Structural Engineering, 2014. – Vol. 140. № 11. – pp. 04014084-1-11.
8. Китов, Ю. П. О целесообразности усиления двутавровых балок путем заполнения межполочных пустот бетоном [Текст] / Ю. П. Китов, М. А. Веревичева, Л. Б. Кравцов // Будівельні конструкції. Міжнародний науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону». Зб. наук. праць. – 2011. – Вип. 74. – С. 318 – 325.
9. Тимошенко, С. П. Механика материалов [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гере – Москва : Мир, 1976. – 564 с.
10. ГОСТ 26020-83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент [Текст]. – Введ. 1986-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 2003. – 5 с.
11. Державні будівельні норми України. ДБН В.2.6-160:2010. Конструкції будинків і споруд. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – Надано чинності 2011-11-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 55 с.
12. Голоднов, К. О. Несуча здатність сталобетонних балок при небагаторазово повторних і знакозмінних режимах навантаження [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Голоднов Костянтин Олександрович ; Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій. – Київ, 2015. – 20 с.
13. Лапенко, О. І. Залізобетонні конструкції з робочим армуванням незнімною опалубкою [Текст] : монографія / О. І. Лапенко. – Полтава : ТОВ «АСМІ», 2009. – 328 с.
14. Weiwei Lin. Experimental and Numerical Study on Mechanical Behavior of Composite Girders under Hogging Moment / Weiwei Lin, Teruhiko Yoda // Advanced Steel Construction - 2013 Vol. 9, No. 4, pp. 309-333.

Ю. П. КИТОВ¹, Г. Л. ВАТУЛЯ², М. А. ВЕРЕВИЧЕВА³, С. В. ДЕРИЗЕМЛЯ^{4*}

¹ Кафедра «Будівельна механіка і гідравліка», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха 7, Харків, Україна, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, ел. пошта budmekh@ukr.net

² Кафедра «Будівельна механіка і гідравліка», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха 7, Харків, Україна, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, ел. пошта vatulya@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-3823-7201

³ Кафедра «Будівельна механіка і гідравліка», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха 7, Харків, Україна, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, ел. пошта budmekh@ukr.net

^{4*} Кафедра «Будівельна механіка і гідравліка», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха 7, Харків, Україна, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, ел. пошта s.deryzemlia@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-6556-4454

РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПЕРЕРІЗІВ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

Мета. Метою запропонованої статті є визначення оптимальної з точки зору вартості і міцності форми і розмірів комбінованого перерізу з урахуванням характеристик матеріалів, що містяться. **Методика.** Числові

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

дослідження комбінованих рівномісних перерізів, що базуються на властивостях приведених перерізів, складових матеріалів і результатах експериментальних даних різних авторів. **Результати.** На підставі сортаменту сталених двотаврів був виконаний розрахунок і підбір комбінованого двотаврового перерізу, у якого верхня полиця замінена на тонкостінне стальне «корито», заповнене бетоном, і його порівняння з двотавровим перерізом, посиленого бетонною плитою. Щоб досягти умову рівномірності, підбираються висота і ширина бетонної плити. Показано, що найбільш вигідне з точки зору вартості є тавровий сталений переріз з верхньою полицею у вигляді тонкостінного сталеного «корита» з бетонною плитою. **Наукова новизна.** У результаті виконаних розрахунків, на підставі умови рівномірності, вибрані оптимальні вид і розміри сталобетонного перерізу, що забезпечують найменшу вартість. **Практична значимість.** У наш час сталезалізобетонні конструкції все частіше використовуються у будівництві. Це пов'язано з тим, що вони мають меншу у порівнянні з залізобетоном власну вагу, в також їх стальна частина може виступати у якості незнімної опалубки. Удосконалення таких конструкцій призводить до підвищення міцнісних характеристик і зниженню вартості.

Ключові слова: сталобетон; наведений переріз; рівномірний переріз; сталезалізобетонна балка; згинальний момент

YU. P. KITOV¹, G. L. VATULIA², M. A. VEREVICHEVA³, S. V. DERYZEMLIA^{4*}

¹ Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feuerbach square, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel/fax +38 (057) 730 10 70, e-mail: budmekh@ukr.net

² Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feuerbach square, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel/fax +38 (057) 730 10 70, e-mail vatulya@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-3823-7201

³ Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feuerbach square, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel/fax +38 (057) 730 10 70, e-mail budmekh@ukr.net

^{4*} Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feuerbach square, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel/fax +38 (057) 730 10 70, e-mail s.deryzemlia@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-6556-4454

RATIONALIZATION OF COMPOSITE BEAM CROSS SECTION

Purpose. Authors describe optimal combine cross section's dimensions and form determination from the cost and strength point of view, taking into account physical-mechanical properties of utilizing materials. **Methodology.** Numerical investigations of composite uniform strength cross-sections have been provide based on the reduced cross section properties, peculiarities of structural materials and experimental results of various authors. **Findings.** The calculations and sections analysis done utilizing the double-T iron assortment. The calculation results compared for combine H-beam whose top flange changed on thin-walled steel case filled by concrete and ordinary H-beam strengthened by concrete slab. Its' depth and width choses due to uniform strength conditions. Provided investigations shown the cost advantages of H-beams with top flange changed on concrete filled thin-walled steel case. **Originality.** Effective costless cross section's dimensions and form peculiarity proved by the results of uniform strength calculations. **Practical value.** Composite structures are widely used in construction and renovation practice. This helps to decrease the materials consumption value and bridge span dead weight. Thin-walled steel case can be use as retained formwork. Described structures advancing helps to increase their strength properties and simultaneously ensure cost decrease.

Keywords: steel concrete; reduced cross-section; uniform strength cross-section; composite beam; bending moment

REFERENCES

1. Storozhenko L. I., Semko O. V., Pents V. F. *Stalezalizobetonni konstruktsii* [Composite structures]. Poltava, 2005. 181 p.
2. Klimenko F. Ye. *Stalezhelezobetonnye konstruktsii s vneshnim polosovym armirovaniem* [Composite structures with external strip reinforcement]. Kyiv, Budivelnyk Publ., 1984. 88 p.
3. Vatulia G. L. *Raschet i proektirovanie kombinirovannykh i stalebetonnykh konstruktsiy* [Calculation and design of composite and steel-concrete structures. Doct. Diss.]. Kharkov, 2015. 430 p.
4. Storozhenko L. I., Lapenko O. I., Horb O. H. *Eksperymentalni doslidzhennia balok dvotavrovoho pererizu z verkhnimy zalizobetonnyy polytsiamy* [Experimental studies of I-shaped cross section beam with upper concrete flange]. *Zbirnyk naukovykh prats Poltavskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu im. Yuriia*

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Kondratiuka "Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo" [Proc. of Poltava National Technical Yuri Kondratiuk University], 2009, issue 24, pp. 85-90.
5. Storozhenko L. I., Krupchenko O. A. Stalezalizobetonni balky iz zalizobetonnyim verkhnim poiasom [Composite beams with reinforced concrete upper flange]. *Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivska politekhnika" Teoriia i praktyka budivnytstva* [Proc. of National University Lviv Polytechnic "Theory and practice of building"], 2010, issue 662, pp. 354-360.
 6. Jianguo Nie, Yan Xiao, Lin Chen. Experimental Studies on Shear Strength of Steel-Concrete Composite Beams. *Journal of Structural Engineering*, 2004, Vol 130, issue 8, pp. 1206 – 1214.
 7. Vasdravellis G., Brian Uy. Shear Strength and Moment-Shear Interaction in Steel-Concrete Composite Beams. *Journal of Structural Engineering*, 2014, Vol. 140, issue 11, pp. 04014084-1-11.
 8. Kitov YU. P., Verevicheva M. A., Kravtsiv L. B. O tselesoobraznosti usileniia dvutavrovnykh balok putem zapolneniia mezhplochnykh pustot betonom [Expediency of I-beams strengthening by their inter flange hollows concreting]. *Budivelni konstruktzii. Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk "Naukovo-tekhnichni problemy suchasnoho zalizobetonu"* [Building Constructions. International Science and Technology journal. "Science and Technology problems of modern reinforced concrete".], 2011, issue 74, pp. 318-325.
 9. Timoshenko S. P., Gere Dzh. *Mekhanika materialov* [Mechanics of materials]. Moscow, Mir Publ., 1976. 564 p.
 10. GOST 26020-83. Dvutavry stalnye goriachekatannye s parallelnymi graniami polok. Sortament. [State Standard 26020-83. Hot-rolled steel I-beam with parallel flange edges. Assortment]. Moscow, Standartinform Publ., 2003. 5 p.
 11. DSTU V.2.6-160:2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Stalezalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia. [State Standard V.2.6-160:2010. Buildings and constructions structures. Composite structures. Main rules]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2010. 55 p.
 12. Holodnov K. O. *Nesucha zdattist stalebetonnykh balok pry nebahatorazovo povtornykh i znakovminnykh rezhymakh navantazhennia. Avtorefetar Diss.* [Carrying capacity of steel concrete beams under frequent iterative and sign-variable load conditions. Author's abstract.]. Kyiv, 2015. 20 p.
 13. Lapenko O. I. *Zalizobetonni konstruktsii z robochym armuvanniam neznimnoi opalobkoii* [Reinforced concrete structures with working reinforcement by retained formwork]. Poltava, ASMI Publ, 2009. 328 p.
 14. Weiwei Lin, Teruhiko Yoda *Experimental and Numerical Study on Mechanical Behavior of Composite Girders under Hogging Moment*. Advanced Steel Construction - 2013 Vol. 9, No. 4, pp. 309-333.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. А. Плугиным (Украина), д.т.н., проф. Д. О. Банниковым (Украина).

Поступила в редколлегию 26.09.2016.

Принята к печати 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.072.2.012.45

П. М. КОВАЛЬ^{1*}, О. Я. ГРИМАК²

^{1*} Кафедра архітектурних конструкцій, Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, вул. Вознесенський узвіз, 20, Київ, Україна, 04053, тел. +038 (044) 272 19 70, ел. пошта koval_pm@meta.ua, ORCID 0000-0002-0040-5900

² Кафедра «Автомобільні дороги та мости», Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. + 038 (032) 258 21 11, ел. пошта grymak5oleg@gmail.com, ORCID 0000-0002-0515-1663

ВПЛИВ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОБОТУ БЕТОННИХ БАЛОК, АРМОВАНИХ БАЗАЛЬНОПЛАСТИКОВОЮ АРМАТУРОЮ

Мета. Встановлення впливу малоциклових навантажень на зміну напружено-деформованого стану бетонних балок, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою. **Методика.** Для досягнення поставленої мети було досліджено 48 бетонних і базальтофібробетонних балок, армованих базальтопластиковою арматурою, на дію одноразових і малоциклових навантажень за схемою чистого згину на силовому стелі. **Результати.** Отримано експериментальні дані про напружено-деформований стан бетонних та базальтофібробетонних балок, армованих базальтопластиковою арматурою, при дії одноразових та малоциклових навантажень. Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень. Встановлено, що малоциклові навантаження не зменшують несну здатність бетонних балочних елементів, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою, але вони викликають збільшення прогинів і ріст ширини розкриття тріщин. **Наукова новизна.** Вперше отримано експериментальні дані щодо напружено-деформованого стану, тріщиностійкості і прогинів балочних елементів, що згинаються при дії малоциклових навантажень. **Практична значимість.** Отримані експериментальні результати дають можливість розробити рекомендації з розрахунку прогинів і ширини розкриття тріщин бетонних балок, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою при дії малоциклових навантажень. В перспективі ці результати будуть використані при комплексному обґрунтуванні можливості використання бетонних елементів, армованих базальтопластиковою арматурою, в конструкціях транспортних споруд, які розраховуються на витривалість.

Ключові слова: малоциклові навантаження; бетонні балки; базальтопластикові арматури; базальтофібробетон

Вступ

Більшість транспортних споруд збудовані та споруджуються в даний час із залізобетону. Так в Україні залізобетонні мости становлять 95,7 % від загальної кількості залізничних, автодорожніх і міських мостів [2]. Але залізобетонні мости мають суттєві проблеми в експлуатації. Так в державному стандарті України [1] встановлені такі проектні терміни служби мостів залежно від конструкцій: 70 років для збірних, 80 – для збірно-монолітних та 100 – для монолітних. Але реальні терміни служби залізобетонних конструкцій мостів в Україні не перевищують 40-50 років [3]. Як свідчить аналіз зарубіжної інформації, аналогічні проблеми є і в інших країнах. Так в роботі [12] вказується, що середній життєвий цикл залізобетонних

мостів Японії, встановлений міністерством фінансів, становить 60 років. Основною причиною невідповідності фактичних термінів мостів із залізобетонними конструкціями проектним термінам служби є корозія арматури, яка викликає втрату несучої здатності споруди [2,3].

Відомо, що сталеві арматури при дії зовнішнього середовища кородують, втрачаючи частину свого перерізу. В залізобетонних елементах від корозії вона захищена бетоном, який створює лужне середовище. Конструкції мостів експлуатуються в складних умовах, вони знаходяться під дією агресивного середовища, тому в їх залізобетонних елементах проходить карбонізація і хлоризація бетону, який втрачає при цьому захисні функції, розкриваються тріщини, відбуваються виколи і пошкодження захисного

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

шару бетону. В результаті цих процесів сталеві арматура, яку не захищає бетон, починає кородувати і технічний стан споруди суттєво погіршується.

Підвищити довговічність транспортних споруд дозволяє використання неметалевої арматури для армування їх бетонних конструкцій. В Україні під керівництвом професора Клімова Ю. А. було проведено комплекс експериментальних досліджень неметалевої композитної арматури на основі базальто- і склоровінігу та бетонних балок, армованих такою арматурою. В результаті досліджень [6] визначені фізико-механічні характеристики такої арматури, вивчено зчеплення неметалевої арматури з бетоном, особливості роботи бетонних елементів, що згинаються, армованих неметалевою арматурою, при дії одноразових навантажень. Базуючись на цих дослідженнях була розроблена Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінігу [5].

Але сфера застосування цього стандарту не поширюється на конструкції, що розраховуються на витривалість. Відомо, що в транспортних спорудах є конструкції, які не розраховуються на витривалість згідно вимог діючих норм на проектування, а є конструкції, які треба розраховувати на витривалість. Тому в даний час є можливість проектувати ряд бетонних конструкцій транспортних споруд, армованих неметалевою арматурою, згідно вимог Настанов [5]. Для того, щоб проектувати бетонні конструкції транспортних споруд, армовані неметалевою арматурою, які працюють на витривалість, необхідно провести дослідження роботи таких елементів на циклічні навантаження та розробити відповідні норми з розрахунку.

Діапазон використання композитного армування бетону досить великий. Цікавим є використання для армування системи, яка складається з органічних високоміцних волокон у вигляді сітки і стабілізованої неорганічної матриці, призначеної для з'єднання цієї сітки з бетоном. Застосування такого армування, як показали дослідження [4], суттєво збільшило міцність, жорсткість і тріщиностійкість балок.

Варто відмітити що за кордоном запроектовано і збудовано різні споруди, в тому числі мости, які мають несучі конструкції із бетону, армованого неметалевою арматурою [8,11], во-

ни успішно експлуатуються ряд років. Науковці різних країн працюють над проблемою використання неметалевої арматури для армування бетонних конструкцій. За результатами їх досліджень та експериментального будівництва були прийняті нормативні документи з проектування конструкцій з неметалевою композитною арматурою в США [7], Канаді [9,10], Японії [14], Європейському Союзі [13].

Мета дослідження

Встановлення впливу малоциклового навантаження на зміну напружено-деформованого стану бетонних балок, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою.

Методика дослідження

Дослідними зразками були балки перерізом 100×200 мм і довжиною 2100 мм (рис. 1), які виготовлялися із бетону класу В40. Каркаси балок складаються з одного стержня робочої арматури діаметру 4; 6; 8; 10; 12 та 13 мм базальтопластикової арматури АНПБ (див. рис. 1). В крайніх третинах прогону було забезпечено поперечне армування арматурою $\varnothing 6$ мм класу А-1 довжиною 180 мм. Крок поперечних стержнів становив 100 мм, загальна кількість стержнів поперечної арматури – 16 шт. Верхнє армування виконане стержнями $\varnothing 6$ мм класу А-1 довжиною 730 мм в крайніх третинах прогону. Коефіцієнт армування поперечного перерізу конструкції ($\rho_{f,tot}$) становить 0,00073; 0,00158; 0,00286; 0,00446; 0,00649; 0,0077.

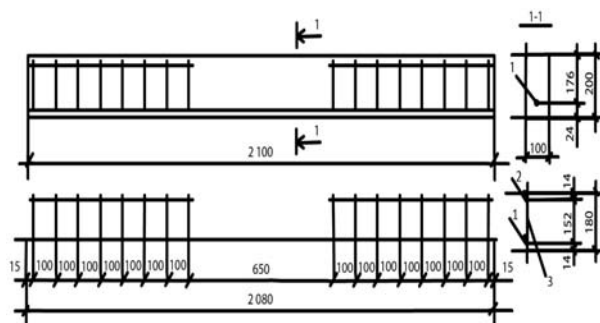


Рис.1 Конструкція базальтобетонних балок:
1 – 1Ø(4; 6; 8; 10; 12; 13) АНПБ; 2 – 2Ø6А-1; 3 – 16Ø6А-1

Всього було досліджено 48 балок, з них: 12 – базальтобетонних балок марки Б на статичні навантаження; 12 – базальтобетонних балок марки Б на малоциклові навантаження; 12 – базальтофібробетонних балок марки Бф на стати-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

чні навантаження; 12 – базальтофібробетонних балок марки Бф на малоциклові навантаження. Дослідні балки були розбиті на 6 серій (I, II, III, IV, V, VI) в залежності від коефіцієнту армування ($\rho_{f, tot}$). В залежності від виду навантажен-

ня зразки було розбито на підсерії – 1(одноразові навантаження) і 2 (малоциклові навантаження). Дані про склад експериментальних досліджень наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Програма експериментальних досліджень бетонних балок, армованих базальтопластиковою арматурою

Серія	Робоча арматура Коефіцієнт армування	Одноразові навантаження		Малоциклові навантаження	
		Маркування зразків	Кількість балок	Маркування зразків	Кількість балок
I	1Ø4АНПБ 0,00073	I-Б1	2	I-Б1 М	2
		I-Б2		I-Б2 М	
		I-Бф1	2	I-Бф1 М	2
		I-Бф2		I-Бф2 М	
II	1Ø6АНПБ 0,00158	II-Б1	2	II-Б1 М	2
		II-Б2		II-Б2 М	
		II-Бф1	2	II-Бф1 М	2
		II-Бф2		II-Бф2 М	
III	1Ø8АНПБ 0,00286	III-Б1	2	III-Б1 М	2
		III-Б2		III-Б2 М	
		III-Бф1	2	III-Бф1 М	2
		III-Бф2		III-Бф2 М	
IV	1Ø10АНПБ 0,00446	IV-Б1	2	IV-Б1 М	2
		IV-Б2		IV-Б2 М	
		IV-Бф1	2	IV-Бф1 М	2
		IV-Бф2		IV-Бф2 М	
V	1Ø12АНПБ 0,00649	V-Б1	2	V-Б1 М	2
		V-Б2		V-Б2 М	
		V-Бф1	2	V-Бф1 М	2
		V-Бф2		V-Бф2 М	
VI	1Ø13АНПБ 0,0077	VI-Б1	2	VI-Б1М	2
		VI-Б2		VI-Б2 М	
		VI-Бф1	2	VI-Бф1 М	2
		VI-Бф2		VI-Бф2 М	

Випробування здійснювали на силовому стенді (рис. 2) двома зосередженими силами, розташованими в третинах прогону за схемою чистого згину. Фіброві деформації бетону по

висоті балки в середині прогону заміряли індикаторами з ціною поділки 0,001 мм на базі 200 мм та тензорезисторами на базі 50 мм у комплекті з вимірювальним приладом АДД 4М.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Прогини балок і осадки опор вимірювали прогиномірами Аістова ПА06. Ширину розкриття тріщини визначали за допомогою мікроскопа МПБ-2 і з ціною поділки 0,05 мм.



Рис. 2. Дослідження напружено-деформованого стану конструкцій, що згинаються, армованих композитною арматурою

Базою для оцінки роботи дослідних зразків балок на малоциклові навантаження були дані, отримані при випробуваннях аналогічних балок, випробуваних на одноразові навантаження.

Для випробування на малоциклові навантаження базою випробувань було прийнято число $N=10$ циклів (рис. 3). На балках-близнюках при одноразовому статичному завантаженні були визначені значення руйнівного навантаження R_{cr} . Базовим рівнем навантаження, до якого доводилися зразки, прийнято $0,6R_{cr}$.

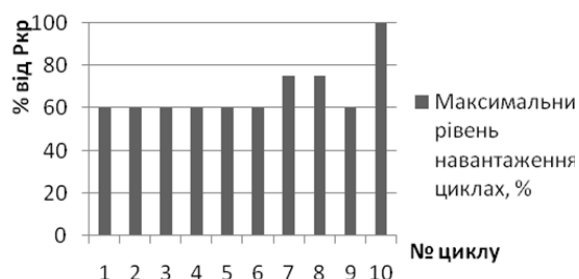


Рис. 3. Схема малоциклових навантажень

Для того, щоб моделювати довантаження конструкції до вищого рівня, після перших шести циклів з максимальним рівнем навантаження $0,6R_{cr}$, на сьомому і восьмому циклі рівень навантаження був доведений до $0,75R_{cr}$.

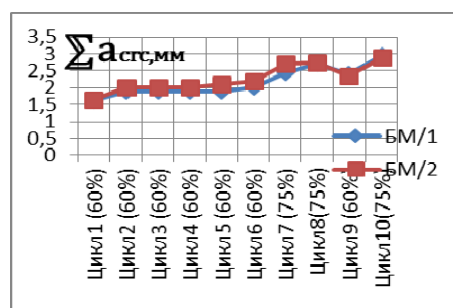
Дев'ятий цикл був проведений з максимальним рівнем навантаження $0,6R_{cr}$, десятий – знову до $0,75R_{cr}$. Після бази випробувань балки були доведені до руйнування одноразовим прикладенням зусилля з фіксацією руйнівного навантаження. Рівні навантажень були призначені

згідно параметрів циклів роботи автодорожніх мостів, які в середньому становлять $\eta_{top}=0,6\dots 0,8$. Послідовність рівнів навантаження по циклах також визначена на основі спостережень руху великовантажних навантажень по автодорожніх мостах.

Результати досліджень

За результатами випробувань балок на малоциклові навантаження були побудовані графіки збільшення ширини розкриття тріщин та графіки збільшення прогинів балок по циклам завантаження. Приклади таких графіків для балок близнюків серії III приведені на рис. 4.

а)



б)

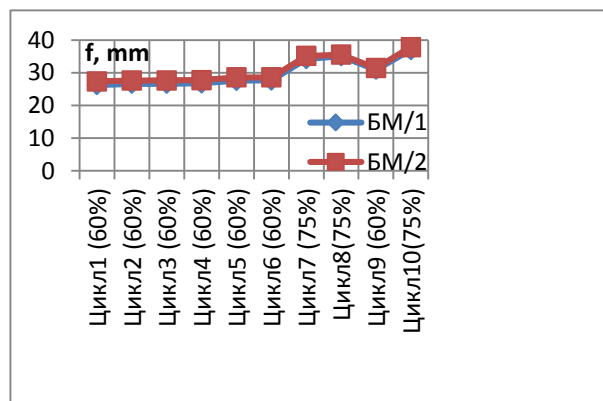


Рис. 4. Графіки: збільшення максимальної ширини розкриття тріщини (а) та графіки збільшення прогинів (б) балок серії III при малоциклових навантаженнях

Отримано експериментальні дані щодо руйнівних навантажень, моментів утворення тріщин, тріщин і прогинів, а також визначено характер руйнування для бетонних балок із різним коефіцієнтом армування базальтопластиковою арматурою (табл. 2).

Варто відмітити що всі балки витримали базу випробувань N , після чого були доведені до руйнування із фіксацією руйнівного зусилля.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень базальтобетонних згинаних елементів на дію малоциклових навантажень

Серія	Маркування зразків	Руйнівне навантаження M_u , кНм	Момент утворення тріщин M_{cr} , кНм	Прогин f при M_u , мм	Характер руйнування
I	I-B1 М	2,67	2,67	0,89	Розрив арматури розтягнутої зони
	I-B2 М	2,83	2,83	0,74	
II	II-B1 М	3,83	3,17	1,78	Розрив арматури розтягнутої зони
	II-B2 М	5	3	1,71	
III	III-B1 М	9,3	2,67	36,93	Розрив арматури розтягнутої зони та роздріб. бетону стиснутої зони
	III-B2 М	9,3	2,67	37,83	
IV	IV-B1 М	12	3,33	39,42	Розрив арматури розтягнутої зони роздріб. бетону стиснутої зони
	IV-B2 М	12	3	40,55	
V	V-B1 М	11,3	3	35,63	Роздрібнення бетону стиснутої зони
	V-B2 М	12	2,87	36,87	
VI	VI-B1 М	14,67	3,33	36,38	Роздрібнення бетону стиснутої зони
	VI-B2 М	12,67	3,33	38,24	

При прикладанні малоциклових навантажень із рівнем навантаження $0,6P_{cr}$ спочатку спостерігалось збільшення прогинів і зростала ширина розкриття тріщин, але далі деформації стабілізувались і ріст прогинів і ширини розкриття тріщин призупинявся. При збільшенні рівня циклічних навантажень до $0,75P_{cr}$ знову збільшувались прогини і зростала ширина розкриття тріщин, що і відображається на відповідних графіках (див. рис. 4).

Важливим є те, що прикладання циклічних навантажень із рівнем навантаження $0,6P_{cr}$ і $0,75P_{cr}$, яке відповідає реальним рівням малоциклових навантажень на автодорожні мости, не призвело до руйнування балок від малоциклової втоми. Руйнівні навантаження для балок, що були випробуванні малоцикловими навантаженнями, за своєю величиною були близькі до руйнівних навантажень для балок, випробуваних одноразовими навантаженнями.

Наукова новизна

Вперше отримано експериментальні дані щодо напружено-деформованого стану, тріщиностійкості і прогинів балочних елементів, що згинаються при дії малоциклових навантажень.

Практична значимість

Отримані експериментальні результати дають можливість розробити рекомендації з розрахунку прогинів і ширини розкриття тріщин бетонних балок, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою при дії малоциклових навантажень. В перспективі ці результати будуть використані при комплексному обґрунтуванні можливості використання бетонних елементів, армованих базальтопластиковою арматурою, в конструкціях транспортних споруд, які розраховуються на витривалість.

Висновки

В результаті досліджень встановлено, що малоциклові навантаження рівнів $0,6P_{cr}$ і

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$0,75P_{cr}$ не зменшують несучу здатність бетонних балочних елементів, що згинаються, армованих базальтопластиковою арматурою. Але такі малоциклові навантаження викликають збільшення прогинів і ріст ширини розкриття тріщин, що необхідно врахувати при розрахунку бетонних балок, армованих базальтопластиковою арматурою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів [Текст]. – На заміну ВБН В.3.1-218-174-2002 Мости та труби. Оцінка технічного стану автодорожніх мостів, що експлуатуються ; надано чинності 2009-11-11. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 49 с.
2. Коваль, П. М. Характеристика технічного стану існуючих мостів України [Текст] / П. М. Коваль // Дороги і мости. – 2003. – С. 15-22.
3. Лантух-Лященко, А. И. Стратегия управления ресурсом железобетонных автодорожных мостов [Текст] / А. И. Лантух-Лященко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 3. – С. 95-100.
4. Мельник, І. В. Експериментальні дослідження залізобетонних балок з поздовжньою арматурою класу А 500С, підсилених композитною системою RUREDIL X MESH GOLD [Текст] / І. В. Мельник, Р. З. Добрянський, Р. І. Канафозький, Н. Б. Давидовський // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 39. – С. 104-109.
5. ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012. Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу [Текст]. – Надано чинності 2014-04-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2012.
6. Солдатченко, О. С. Міцність, жорсткість та тріщиностійкість згинальних конструкцій зі склопластиковою і базальтопластиковою композитною арматурою [Текст] : дис. к-та техн. наук : 05.23.01 / Солдатченко Олександр Сергійович ; Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2012. – 196 с. – Бібліогр.: с. 142-160.
7. ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1R-06 – ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2006. – 44 p.
8. Adel ElSafti, Brahim Benmokrahe, Sami Rizkalla. Degradation Assessment of Internal Continuous Fiber Reinforcement in Concrete Environment: Materials Research Report – University of North Florida. – UNF Projekt Contract No. BDK 82 № 977 – 05. – 2013. – 398 p.
9. CAN/CSA-S806-02, “Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers”, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (May 2002).
10. CAN/CSA-S6-06 “Canadian Highway Bridge Design Code” Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (December 2006)
11. Gscheider, Alfred. Anwendungsbeispiele fuer das vAnfragschwei – Ben nach dem Ellira – Verfahren. “SchwiBtechnik” (Oster) №10. – 2012. – P. 113-115.
12. Matsumoto, T. Survival analysis on bridges for modeling bridge replacement and evaluating bridge performance [Text] / T. Matsumoto. S. S. Beng // Proceeding Japan-Taiwan international workshop on urban regeneration. Maintenance and green material. – 2005. – P. 23-36.
13. Purpose and justification for new design standards regarding the use of fibre-reinforced polymer composites in civil engineering, support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes, EUR 22864 EN – 2007.
14. Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials, Concrete Engineering Series 23, ed. by A. Machida, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, Japan, 1997.

П. Н. КОВАЛЬ^{1*}, О. Я. ГРЫМАК²

^{1*} Кафедра архитектурных конструкций, Национальная академия строительства и архитектуры, ул. Вознесенский спуск, 20, Киев, Украина, 04053, тел. +038 (044) 272 19 70, эл. почта koval_pm@meta.ua, ORCID 0000-0002-0040-5900

² Кафедра «Автомобильные дороги и мосты», Национальный университет «Львовская политехника», Степана Бандеры, 12, Львов, Украина, 79000, тел. + 038 (032) 258 21 11, эл. почта grymak5oleg@gmail.com, ORCID 0000-0002-0515-1663

ВЛИЯНИЕ МАЛОЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА РАБОТУ БЕТОННЫХ БАЛОК, АРМИРОВАННЫХ БАЗАЛТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ

Цель. Определение влияния малоциклических нагрузок на изменение напряженно-деформированного состояния изгибаемых бетонных балок, армированных базальтопластиковой арматурой. **Методика.** Для достижения поставленной цели было исследовано 48 бетонных и базальтофибробетонных балок, армированных базальтопластиковой арматурой, на воздействие одноразовых и малоциклических нагрузок по схеме чистого изгиба на силовом стенде. **Результаты.** Получены экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии бетонных и базальтофибробетонных балок, армированных базальтопластиковой арматурой, при воздействии одноразовых и малоциклических нагрузок. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов экспериментальных исследований. Установлено, что малоциклические нагрузки не уменьшают несущую способность изгибаемых бетонных балочных элементов, армированных базальтопластиковой арматурой, но они вызывают увеличение прогибов и рост ширины раскрытия трещин. **Научная новизна.** Впервые получены экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии, трещиностойкости и прогибах при воздействии малоциклических нагрузок. **Практическая значимость.** Полученные экспериментальные результаты дают возможность разработать рекомендации по расчету прогибов и ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных балок, армированных базальтопластиковой арматурой при воздействии малоциклических нагрузок. В перспективе эти результаты будут использованы при комплексном обосновании возможности использования бетонных элементов, армированных базальтопластиковой арматурой, в конструкциях транспортных сооружений, работающих на выносливость.

Ключевые слова: малоциклические нагрузки, бетонные балки, базальтопластиковая арматура, базальтофибробетон

P. M. KOVAL^{1*}, O. YA. HRYMAK²

^{1*}Department of architectural constructions, National Academy of Fine Arts and Architecture, 20 Voznesenskyi Uzviz st., Kyiv, Ukraine, 04053, tel. +038 (044) 272 19 70, e-mail koval_pm@meta.ua, ORCID 0000-0002-0040-5900

²Department of Roads and Bridges, National University "Lviv Polytechnic", 12 Stepan Bandera St., Lviv, Ukraine, 79000, tel. + 038 (032) 258 21 11, e-mail grymak5oleg@gmail.com, ORCID 0000-0002-0515-1663

IMPACT OF LOW-LOADING CICLES ON CONCRETE BEAMS, STRENGTHED BY BASALT-PLASTIC BARS

Purpose. Investigation of influence of low-loading cycles on change of stress-strain state of bended concrete beams, strengthened by basalt-plastic bars. **Methodology.** The effect of one-off and low-loading cycles of pure bending force on the stand research of 48 concrete and basalt-fiber concrete beams strengthened by basalt-plastic bars has been investigated to achieve this aim. **Findings.** The experimental data on the mode of deformation of ordinary concrete as same as basalt-fiber concrete beams strengthened by basalt-plastic bars under the action of on-off and low-loading cycles were obtained. Comparative analysis of the experimental results were conducted. It was found that low-loading cycles do not reduce the carrying ability of bended concrete beams strengthened by basalt-plastic bars, but they increase deflections width and crack tip opening displacement. **Originality.** For the first time experimental data for concrete beams' strengthened by basalt-plastic bars deformation mode, crack resistance and deflection under the action of low loading cycles was obtained. **Practical value.** The experimental results make it possible to develop the guidance on the calculation of width deflections and crack tip opening displacement of bended concrete beams strengthened by basalt-plastic bars under action of low-loading cycles. In the future these results will be used in complex substantiation of the possibility of using concrete elements, reinforced with basalt-plastic bars in the construction of transport facilities, which are calculated on endurance.

Keywords: low-loading cycles, concrete beams, basalt-plastic bars, basalt-fiber concrete

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

REFERENCES

1. DSTU-N B.V.2.3-23-2013. *Sporudy transportu. Nastanova z otsinyuvannya i prognozuvannya tehnicnogo stanu avtodorozhnih mostiv* [State Standard B.V.2.3-23-2013. Transport constructions. Guidance evaluation and forecasting technical condition of road bridges]. Kyjiv, Minrehionbud Ukrayiny Publ., 2013. 49 p.
2. Kovalj P. M. Kharakterystyka tehnicnogo stanu isnujuchykh mostiv Ukrainy [Description of the technical state of the existing bridge Ukraine]. *Doroghy i mosty – Road and bridge*, 2003, pp. 15-22.
3. Lantukh-Lyashchenko, A. I. Strategiya upravleniya resursom zhelezobetonnykh avtodorozhnykh mostov [Resource management strategy of concrete highway bridges]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, Issue 3, pp. 95-100.
4. Meljnyk I. V., Dobrjanskyj R. Z., Kanafocjkyj R. I., Davydovs'kyj N. B. Eksperymental'ni doslidzhennja zalizobetonnykh balok z pozdovzhnjoho armaturoju klasu A 500S, pidsylenykh kompozytnoju systemoju RUREDIL X MESH GOLD [Experimental study of reinforced concrete beams with longitudinal reinforcement Class A 500C reinforced composite system RUREDIL X MESH GOLD]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 39, pp. 104-109.
5. DSTU-N B V.2.6-185:2012. *Nastanova z proektuvannja ta vygotovlennja betonnykh konstrukcij z nemetalevoju kompozytnoju armaturoju na osnovi bazal'to- i sklorovinghu* [Guidelines for the design and manufacture of concrete structures with non-metallic composite reinforcement based bazalto- and roving]. Kyjiv, Minrehionbud Ukrayiny Publ., 2012.
6. Soldatchenko O. S. Micnistj, zhorstkistj ta trishhynostijkistj zghynalnykh konstrukcij zi skloplastykovoju i bazal'toplastykovoju kompozytnoju armaturoju [The strength, hardness and fracture toughness bending designs with fiberglass and composite reinforcement bazaltoplastykovoyu]. Kyjiv, 2012. – 196 p.
7. ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1R-06 – ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2006. 44 p.
8. Adel ElSafti, Brahim Benmokrahe, Sami Rizkalla. Degradation Assessment of Internal Continuous Fiber Reinforcement in Concrete Environment: Materials Research Report. University of Nort Florida. UNF Projekt Contract No. BDK 82 № 977. 05, 2013. 398 p.
9. CAN/CSA-S806-02, "Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers", Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (May 2002)
10. CAN/CSA-S6-06 "Canadian Highway Bridge Design Code" Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (December 2006)
11. Gscheider Alfred. Anwendungsbeispiele fur das vAnfragschwei – Ben nach dem Ellira – Verfahren. "SchwiBtechnik" (Oster) № 10, 2012, pp. 113-115.
12. Matsumoto T., Beng S. S. Survival analysis on bridges for modeling bridge replacement and evaluating bridge performance. Proceeding Japan-Taiwan international workshop on urban regeneration. Maintenance and green material, 2005, pp. 23-36.
13. Purpose and justification for new design standards regarding the use of fibre-reinforced polymer composites in civil engineering, support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes, EUR 22864 EN, 2007.
14. Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials, Concrete Engineering Series 23, ed. by A. Machida, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, Japan, 1997.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н, проф. Б. Г. Демчиною (Україна), д.т.н., проф. Д. О. Банников (Україна).

Надійшла до редколегії 25.11.2016.

Прийнята до друку 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.095.32:621.882.64

М. П. КОВАЛЬ*

* Кафедра аеропортів, Національний транспортний університет, вул. Суворова 1, Київ, Україна, 01010,
тел. +38 (050) 132 44 14, ел. пошта m_koval@meta.ua

ЕФЕКТИВНІСТЬ ОПОРНОГО АНКЕРУВАННЯ БОЛТОВИМИ З'ЄДНАННЯМИ СТАЛЕВОГО ПРОФІЛЬОВАНОГО НАСТИЛУ У МОНОЛІТНИХ ПЛИТАХ

Мета. Встановлення можливості застосування болтових з'єднань для опорного анкерування сталевих профільованих настилу у монолітних залізобетонних плитах за допомогою стендових випробувань дослідних зразків при дії статичного навантаження. **Методика.** Для виконання поставленої мети були виготовлені дослідні зразки, що моделюють фрагменти плит проїзної частини мостів – монолітні плити, армовані сталевим профільованим настилом із болтовим опорним анкеруванням. Дослідні зразки були випробувані стендовим способом за схемою чистого згину при дії статичного навантаження. **Результати.** В ході стендових випробувань експериментально встановлена несуча здатність монолітних плит, армованих сталевим профільованим настилом із болтовим опорним анкеруванням, що є співставною з несучою здатністю монолітних плит з приварним опорним анкеруванням профільованого настилу. Зроблений висновок про безпосередній вплив профільованого настилу на живучість зразків внаслідок запобігання прогресуючому обваленню. **Наукова новизна.** В ході стендових випробувань дослідних зразків були отримані дані про їх несучу здатність, описаний характер тріщиноутворення, роботи та руйнування зразків при дії статичного навантаження. **Практична значимість.** Отримане експериментальне підтвердження можливості та перспективності застосування болтового анкерування профільованого настилу при його використанні у мостовому будівництві як незнімної опалубки та робочої арматури плит проїзної частини.

Ключові слова: зовнішнє армування; незнімна опалубка; плита проїзної частини моста; сталевий профільований настил; статичне навантаження

Вступ

Сталевий профільований настил (СПН) набув широкого застосування у промисловому та цивільному будівництві, як незнімна опалубка (НО) та робоча арматура (РА) монолітних залізобетонних перекриттів [3, 9, 11, 12, 13]. Таке застосування СПН дозволяє відмовитись від використання інвентарної опалубки та підтримуючих конструкцій (риштувань), підвищити темпи будівництва, знизити працемісткість та вартість будівельних робіт. Ці чинники є актуальними для мостового будівництва – діючі норми [8] регламентують влаштування плити проїзної частини (ППЧ) мостів тільки монолітною; застосування для спорудження ППЧ знімної опалубки із підтримуючими конструкціями у ряді випадків (будівництво мостів над крупними водотоками, глибоким рельєфом, діючими автошляхами та залізницями, особливо електрифікованими) пов'язане із низкою складнощів,

уникнути яких дозволяє використання незнімної опалубки плити проїзної частини [16]. Прикладом теоретичної проробки цього питання є плитна прогонова будова автодорожнього моста оригінальної конструкції, розроблена в ХНАДУ [2]; в Україні збудовано ряд мостів з незнімною опалубкою плити проїзної частини із СПН [1].

Постановка проблеми та пошук вирішення

Для застосування СПН, як робочої арматури монолітних залізобетонних плит, необхідно забезпечити його спільну роботу з бетоном плити, що досягається за допомогою анкерування СПН. Необхідною умовою включення СПН в роботу плити, як робочої арматури, є наявність опорного анкерування профільованого настилу [5, 14], що найчастіше виконується за допомогою приварних анкерів типу Nelson [15], що приварюються крізь метал настилу до

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

головних балок, на які встановлений СПН. Ці стрижневі анкери (або гнучкі упори) із висадженими голівками приварюються напівавтоматичним дугоконтактним електрозварюванням за допомогою зварювального пістолета [4].

Даний спосіб опорного анкерування настилу є можливим лише у випадку установки СПН на металеві балки; у випадку зведення споруди (наприклад, моста) із залізобетонними головними балками застосувати його із зрозумілих причин є неможливим. Для мостового будівництва це суттєвий недолік, оскільки мости із залізобетонними головними балками (переважно малих та середніх прогонів) в Україні є переважаючими – 91,5 % від загальної кількості експлуатованих на магістральних та місцевих автомобільних дорогах [10]; ця цифра приблизно корелюється із об'єктами нового будівництва.

Ще одним недоліком застосування приварюваних анкерів є потреба в наявності спеціфічного електрозварювального обладнання та залучення до виконання робіт кваліфікованих виконавців – електрозварювальників. Застосування інших способів опорного анкерування профільованого настилу дозволило б уникнути цих недоліків та розширити сферу застосування профільованого настилу як НО та РА монолітних залізобетонних плит в цілому та ППЧ мостів зокрема. З цією метою було прийнято рішення дослідити можливість заміни приварних опорних анкерів болтовими.

Дане рішення стало еволюційним розвитком винаходів автора, що отримав патенти на дві корисні моделі по способу фіксації [6] та анкерування [7] СПН у монолітних плитах, влаштованих по залізобетонних балках. У обох випадках вирішувалась задача фіксації настилу, встановленого на залізобетонні балки, за допомогою болтів, що після загвинчування притискають СПН своїми голівками та шайбами до головної балки. Був запропонований спосіб опорного анкерування настилу за допомогою болтових з'єднань: болт із заздалегідь нагвинченою гайкою з шайбою вставляється у отвір, висвердлений в нижній полиці настилу, вкручується в опорну поверхню (у різьбу, висвердлену в металевій балці чи в металевий дюбель, вставлений у глухий отвір в залізобетонній балці), після чого СПН притискається до опорної поверхні шайбою з вигвинченою гайкою. Цей спосіб опорного анкерування є більш універсальним, оскільки може бути застосова-

ним при встановленні СПН як на металеві, так і на залізобетонні головні балки прогонової будови.

Мета роботи

Зважаючи на відсутність досліджень роботи монолітних плит із болтовим опорним анкеруванням настилу, автором була визначена мета: експериментальним чином встановити ефективність опорного анкерування болтовими з'єднаннями сталевого профільованого настилу у монолітних залізобетонних плитах.

Методика виконання досліджень

Для виконання поставлених задач у індивідуальній опалубці були виготовлені дослідні зразки-близнюки (рис. 1), що моделюють натурні плити проїзної частини; вони отримали назву «серія ПН».

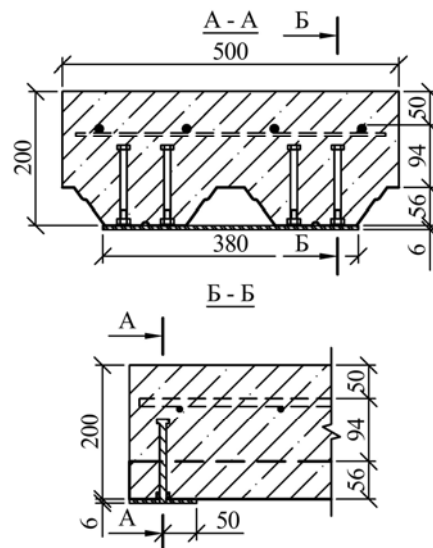


Рис. 1. Перерізи зразка серії ПН

Незмінною опалубкою та робочою арматурою дослідних зразків є гладкий сталевий профільований настил Т57 компанії «Прушинські»; двогофрові елементи настилу встановлювались кінцями на сталеві пластини 380×100×6 мм, що імітували верхні полиці головних балок прогонової будови та виконували роль опорних пластин під час випробувань. У опорних зонах нижнього поясу настилу висвердлювались отвори Ø11 мм, в які вставлялись болти М10 із нагвинченими гайками з шайбами; болти загвинчувались у отвори з метричною різьбою, влаштовані в металевих пластинах. Профільований настил

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

притискався до опорних пластин через шайби за допомогою вигвинчених вниз до упору гайок.

Зразки довжиною 1,5 м, висотою 0,2 м та шириною 0,5 м були виготовлені із важкого бетону лабораторного виготовлення, що готувався окремими замісами у вертикальному примусовому бетонозмішувачі з верхнім розташуванням моторедуктора та після укладки в опалубку ущільнювався за допомогою глибинного вібратора; кубикова міцність бетону за результатами випробувань контрольних зразків (кубів) відповідає класу В50. В верхній зоні кожного зразка розташована в'язана арматурна сітка 4Ø12A500C–130/10Ø8A500C–150 1,47×0,46 м із захисним шаром 5 см, що моделює верхню робочу арматуру плити проїзної частини. Стрижнева арматура у нижній зоні зразків відсутня – роль робочої арматури зразків виконував профільований настил.

Випробування зразків проводилось стендовим способом за схемою чистого згину з робочим прогоном зразків 1,4 м (рис. 2).

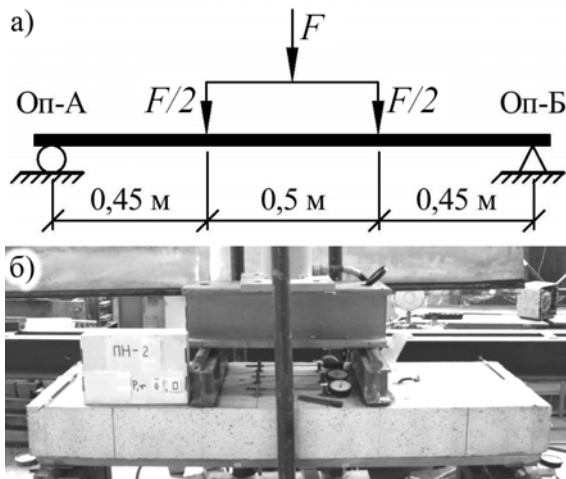


Рис. 2. Випробування дослідних зразків:
а – статична схема випробування; б – загальний вигляд зразка ПН-2 у випробувальному стенді

Покрокове навантаження зразків здійснювалось за допомогою гідравлічного домкрата; зусилля F , створюване ним, було взяте за основний параметр навантаженості зразків, і контролювалось за допомогою манометра маслостанції та тарованого кільцевого динамометра в складі випробувального стенду. Зусилля від домкрата передавалось на зразки за допомогою системи траверс (відстань в осях передаточних траверс 0,5 м). Для зручності була прийнята

нумерація опор: Оп-А – шарнірно-рухома опора, Оп-Б – шарнірно-нерухома опора.

Орієнтовна несуча здатність зразків серії ПН (при допущенні, що замість болтових опорних анкерів застосовувались приварні) була визначена згідно з [5]: по згинальному моменту вона становить 9,92 кНм. Згідно з прийнятою статичною схемою випробувань це відповідає 44,09 кН, створюваних гідравлічним домкратом. Фактичну несучу здатність зразків серії ПН та, відповідно, ефективність застосованого болтового анкерування СПН слід було встановити експериментально.

Результати проведених досліджень

Зразки випробовувались поступово збільшуваним статичним навантаженням із кроком +5 кН для ПН-1 та +10 кН для ПН-2 з часовою витримкою 5-7 хвилин на кожному кроці. Під час перших привантажень зразків спостерігалось незначне рівномірне зростання прогинів (за допомогою прогиномірів ПАО-6 визначались прогини верхньої грані зразків), що свідчило про включення СПН в сумісну роботу з бетоном зразків.

По досягненню рівня навантаження 65 кН для ПН-1 та 70 кН для ПН-2 відбулась втрата несучої здатності зразків – посередині прогону розкрились перші вертикальні тріщини, що досягли по висоті рівня розташування верхніх арматурних сіток. Перша тріщина у зразку ПН-1 (рис. 3) розкрилась зі зміщенням на 7...10 см відносно середини прогону в сторону опори А; у зразку ПН-2 (рис. 4) перша тріщина розкрилась зі зміщенням на 3...5 см відносно середини прогону в сторону опори Б.

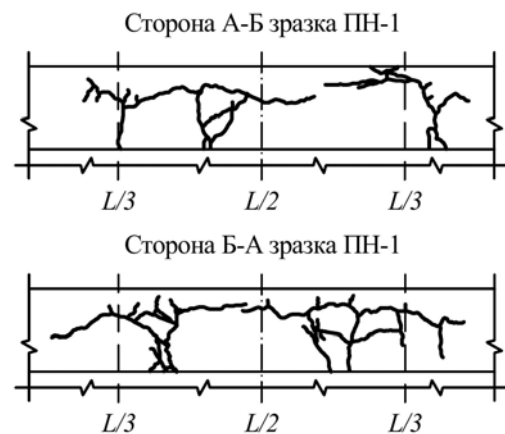


Рис. 3. Характер тріщиноутворення у зразку ПН-1

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Розкриття тріщин супроводжувалось тріском бетону, відшаровуванням настилу від бетону зразка та просковзуванням його відносно торців зразків, різким зростанням прогинів та зменшенням показів кільцевого динамометра та манометра маслостанції через падіння тиску в маслоконтурі.

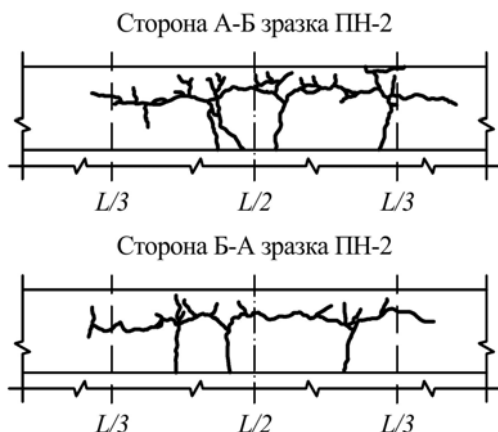


Рис. 4. Характер тріщиноутворення у зразку ПН-2

Усі вертикальні тріщини, що утворювались у досліджуваних зразках в подальшому, зупинялись в розвитку після доходження до рівня залягання верхньої арматурної сітки, та зі збільшенням навантаження на зразки розходилися радіально в сторони. У зразку ПН-1 друга вер-

тикальна тріщина розкрилась при досягненні рівня навантаження 120 кН; при подальшому збільшенні навантаження обидві тріщини розходились радіально, при цьому перед руйнуванням зразка ліва радіальна гілка зразка ПН-1 пішла вниз, утворивши вертикальну тріщину в третині прогону з боку опори А.

У зразку ПН-2 друга вертикальна тріщина розкрилась зі зміщенням на 10-15 см відносно центру прогону в сторону опори А при досягненні рівня навантаження 110 кН, сполучившись із радіальними гілками першої тріщини. При досягненні рівня навантаження 140 кН поблизу третини прогону з боку опори А розкрилась третя вертикальна тріщина.

Аналіз отриманих від прогиномірів даних показав, що з початку випробувань досліджуваних зразків та до втрати несучої здатності зростання прогинів відбувалось лінійно, що вказує на хорошу спільну роботу бетону плити та сталевого профільованого настилу; лінійність зростання прогинів спостерігалась навіть після втрати несучої здатності; при цьому розкриття нових тріщин (як першої, внаслідок чого відбувалась втрата несучої здатності, так і наступних) пропорційно збільшувало амплітуду наростання прогинів (рис. 5).

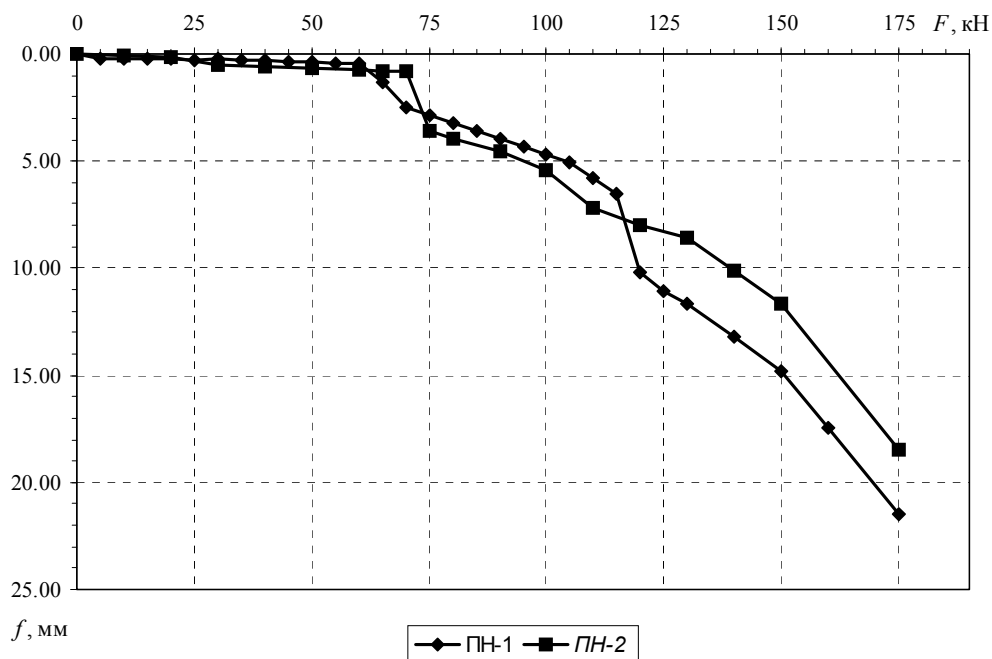


Рис. 5. Прогини зразків ПН-1 та ПН-2

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Після розкриття перших вертикальних тріщин відбулось відшарування СПН від бетону плити, що було помітно візуально. Подальше привантаження зразків супроводжувалось просковзуванням настилу відносно бетону зразків, що свідчить про поступову втрату міцності опорного анкерування – розрив сталевго профільованого настилу у зоні анкерування.

Руйнування зразків ПН-1 та ПН-2 наступило при досягненні рівня навантаження 175 кН. Це супроводжувалось різким наростанням прогинів, спершу неможливістю перевищити вказані рівні навантаження, а далі – повільним падінням показів манометра маслостанції та кільцевого динамометра, появою тріщин на верхніх гранях зразків та незначним випучуванням верхніх полиць СПН в зоні розкриття центральних тріщин, руйнуванням стиснутої зони бетону плит: тріщини в полицях зразків перевищили рівень розташування верхніх арматурних каркасів, на поверхні горизонтальних граней плит з'явилась сітка силових тріщин.

Наукова новизна та практична значимість

В ході стендових випробувань дослідних зразків, що моделюють фрагменти монолітної плити проїзної частини моста, армованої сталевим профільованим настилом із опорним анкеруванням болтовими з'єднаннями, були отримані дані про високу несучу здатність таких зразків. Фактично це свідчить про те, що несуча здатність монолітних залізобетонних плит із болтовим опорним анкеруванням СПН при дії статичного навантаження є співставною із плитами з приварним опорним анкеруванням. Описаний характер тріщиноутворення, роботи та руйнування зразків при дії статичного навантаження. Практична значимість отриманих результатів полягає в експериментальному підтвердженні можливості та перспективності застосування болтового анкерування профільованого настилу при використанні СПН у мостовому будівництві як незнімної опалубки та робочої арматури плит проїзної частини.

Висновки

За результатами випробувань досліджуваних зразків було зроблені такі висновки:

1. Фактична несуча здатність зразків серії ПН дещо перевищує визначену аналітично несучу здатність зразків (при допущенні, що за-

мість болтових опорних анкерів застосовувались приварні). Можна припустити, що несуча здатність монолітних залізобетонних плит із болтовим опорним анкеруванням СПН при дії статичного навантаження є співставною із плитами з приварним опорним анкеруванням; перевищення фактичної несучої здатності над аналітичною може бути зумовлена належною якістю виготовлення зразків, досягнутою в лабораторних умовах, та високими фізико-механічними властивостями бетону лабораторного виготовлення.

2. Застосування болтового опорного анкерування профільованого настилу у бетоні плити є ефективним, оскільки забезпечило належну несучу здатність досліджуваних зразків.

3. У всіх зразках сталевий профільований настил був включений у спільну роботу з бетоном плит до втрати несучої здатності.

4. Випробування засвідчили значну «живучість» зразків – міцності болтового опорного анкерування сталевго профільованого настилу виявилось достатньо, щоби запобігти прогресуючому обваленню зразків після втрати несучої здатності та руйнування зразків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Коваль, М. П. Перспективи застосування сталевих профільованих настилів для влаштування плит проїзної частини автодорожніх мостів [Текст] / М. П. Коваль // Збірник наукових праць (галузевого машинобудування, будівництва) ПолтНТУ. – Полтава, 2012. – Вип. 3 (33). – С. 100-106.
2. Кожушко, В. П. Применение профнастила при реконструкции и ремонте малых мостов [Текст] / В. П. Кожушко, С. Н. Краснов, Е. С. Краснова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 39. – С. 83-86.
3. Лапенко, О. І. Залізобетонні конструкції з робочим армуванням незнімною опалубкою [Текст] : монографія / О. І. Лапенко. – Полтава : ТОВ «АСМІ», 2009. – 328 с.
4. Марочка, В. В. Використання гнучких анкерів з висадженою головкою при виробництві закладних виробів [Текст] / В. В. Марочка, П. О. Бадюл // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2013. – Вип. 4. – С. 37-41.
5. Методичні рекомендації з розрахунку плит проїзної частини мостів із сталевим профільованим настилом : МР В.2.2-02070915-831:2013. – Київ, 2013. – 95 с.
6. Пат. 81364 Україна, МПК (2013.01) E04C 2/00, E01D 19/00. Спосіб фіксації незнімної опалубки

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- зі сталевго профільованого настилу для монолітної залізобетонної плити, влаштованої по залізобетонних балках, за допомогою розпірних з'єднань [Текст] / Коваль М. П. (Україна); заявник та патентовласник Національний транспортний університет. – № у 201300888; заявл. 25.01.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 8 с.
7. Пат. 85139 Україна, МПК (2013.01) E04C 2/00, E01D 19/00. Спосіб анкерування сталевго профільованого настилу у монолітних залізобетонних плитах, влаштованих по залізобетонних балках, за допомогою розпірних та зварних з'єднань [Текст] / Коваль М. П. (Україна); заявник та патентовласник Національний транспортний університет. – № у 201306234; заявл. 20.05.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. – 7 с.
 8. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – Надано чинності 2007-02-01. – Київ: Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
 9. Стороженко, Л. І. Залізобетонні конструкції в незнімній опалубці: монографія [Текст] / Л. І. Стороженко, О. І. Лапенко. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2008. – 312 с.
 10. Експлуатація і реконструкція мостів: підручник [Текст] / Н. Є. Страхова, В. О. Голубев, П. М. Ковальов, В. В. Тодіріка. – Київ: Вид-во Нац. транспорт. ун-ту, 2002. – 403 с.
 11. Biegus A. Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych według eurokodu / Antoni Biegus // – Wrocław: Politechnika Wroclawska, wydział budownictwa lądowego i wodnego, 2012 – 66 s.
 12. Budescu M. Theoretical and Experimental Studies of a Class of Steel Roof Profiles / M. Budescu, I. Ciongradi, O. Rogca // Computational civil engineering – 2004 / ed.: Fidelu Phulei-Crhiniceanu, Constantin Ionescu, Horia Barbat. – Iagi: Editura Societii Academice Matei-Teiu Botez, 2005. – pp. 155 – 165.
 13. Eurocode 4. Common Unified Rules for Composite Steel and concrete Structures. – European Committee for Standardisation. (CEN) ENV. 1994 – I-1:1992. – 180 p.
 14. Lawson R.M. Design of Composite Slabs and Beams with Steel Decking / R. M. Lawson // – SCI, Ascot, Berkshire, 1989. – 124 p.
 15. Nelson. Standardkatalog Bolzenschweißen. – Gevelsberg, Nelson Bolzenschweiß-Nechnik GmbH & Co. KG. – 2001. – 35 s.
 16. United States Pat. 6578343, Int. Cl.7 E04C 2/32; E04B 5/04; E04B 5/00; E04F 13/04; E01D 19/12. Reinforced concrete deck structure for bridges and method of making same / Fred Dumler, Richard L. Lawrence (United States, Pipe Service, Inc).

М. П. КОВАЛЬ*

* Кафедра аеропортів, Національний транспортний університет, ул. Суворова, 1, Київ, Україна, 01010, тел.: +38 (050) 132 44 14, ел. пошта m_koval@meta.ua

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПОРНОЙ АНКЕРОВКИ БОЛТОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ СТАЛЬНОГО ПРОФИЛИРОВАННОГО НАСТИЛА В МОНОЛИТНЫХ ПЛИТАХ

Цель. Определение возможности применения болтовых соединений для опорной анкеровки стального профилированного настила в монолитных железобетонных плитах с помощью стендовых испытаний опытных образцов при действии статической нагрузки. **Методика.** Для достижения поставленной цели были изготовлены опытные образцы, моделирующие фрагменты плит проезжей части мостов – монолитные плиты, армированные стальным профилированным настилом с болтовой опорной анкеровкой. Опытные образцы были испытаны стендовым способом по схеме чистого изгиба при действии статической нагрузки. **Результаты.** В ходе стендовых испытаний экспериментально установлена несущая способность монолитных плит, армированных стальным профилированным настилом с болтовой опорной анкеровкой, которая сравнима с несущей способностью монолитных плит с приварной опорной анкеровкой профилированного настила. Сделан вывод о непосредственном влиянии профилированного настила на живучесть образцов в следствии предотвращения прогрессирующего обваливания. **Научная новизна.** В ходе стендовых испытаний опытных образцов были получены данные об их несущей способности, описан характер трещинообразования, работы и разрушения образцов при действии статической нагрузки. **Практическая значимость.** Получено экспериментальное подтверждение возможности и перспективности применения болтовой анкеровки профилированного настила при его использовании в мостовом строительстве как несъемной опалубки и рабочей арматуры плит проезжей части.

Ключевые слова: внешнее армирование; несъемная опалубка; плита проезжей части моста; стальной профилированный настил; статическая нагрузка

© М. П. Коваль, 2016

M. P. KOVAL*

* Department of Airports, National Transport University, 1 Suvorova st., Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (050) 132 44 14, e-mail m_koval@meta.ua

EFFICIENCY OF CORRUGATED STEEL DECKING BEARING ANCHORING BY BOLTED CONNECTIONS IN MONOLITHIC CONCRETE SLABS

Purpose. Exploring by monolithic concrete slabs tests under static load of the possibility of corrugated steel decking bearing anchoring by bolted connections. **Methodology.** Test specimens were manufactured: fragment models of monolithic concrete bridge deck slabs with external reinforcement by corrugated steel decking with bearing anchoring by bolted connections. Specimens were tested under pure bending scheme by static load. **Findings.** During the tests carrying capacity of monolithic concrete slabs, reinforced by corrugated steel decking with bolted bearing anchoring, was determined; determined carrying capacity is comparable with such capacity of slabs with welded bearing anchoring. After the tests was made a conclusion that corrugated steel decking affects on the survivability of samples by preventing the progressive collapse of specimens. **Originality.** During the laboratory tests data of carrying capacity of specimens was received, nature of crack formation, features of work and destruction of specimens were described. **Practical value.** The experimental confirmation the possibilities and perceptivity of steel decking's bearing bolted anchoring appliance in bridge building were obtained.

Keywords: bridge deck slab; corrugated steel decking; external reinforcement; non-removable formwork; static load

REFERENCES

1. Koval M. P. Perspektyvy zastosuvannya stalevykh profilovanykh nastyliv dlia vlashtuvannya plyt proiznoi chastyny avtodorozhnykh mostiv [Perspectives of usage of corrugated steel decking in roadway bridge deck slabs building]. *Zbirnyk naukovykh prats (galuzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo)* [Collection of scientific papers (sectoral mechanical engineering, building)], 2012, issue 3 (33), pp. 100-106.
2. Kozhushko V. P., Krasnov S. N., Krasnova E. S. Primenenie profnastila pri rekonstrukcii i remonte malykh mostov [Usage of corrugated steel decking in reconstruction and repair of small bridges]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 39, pp. 83-86.
3. Lapenko O. I. Zalizobetonni konstrukcii z robochym armuvanniam neznimnoi opalubkoiu [Reinforced concrete structures with non-removable formwork reinforcement]. *Poltava, ASMI Publ.*, 2009. 328 p.
4. Marochka V. V. Vykorystannia hnuchkykh ankeriv z vysadzhenoii holovkoii pry vyrobnytstvi zakladnykh vyrobiv [The use of concrete anchors in the production of anchor plates]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennia, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2013, issue 4, pp. 37-41.
5. MR V.2.2-02070915-831:2013. Metodychni rekomendacii z rozrakhunku plyt proiznoi chastyny mostiv iz stalevym profilovanykh nastylom [Guidelines V.2.2-02070915-831:2013. Guidelines for calculation of bridge deck slabs with corrugated steel decking]. Kyiv, 2013. 95 p.
6. Koval M. P. *Sposib fiksatsii neznimnoi opalubky zi stalevogo profilovanogo nastylu dlia monolitnoi zalizobetonnoi plyty, vlashtovanoi po zalizobetonnykh balkakh, za dopomogoiu rozpirnykh ziednan* [Method of fixation of corrugated steel decking, which acts as non-removable formwork in monolithic concrete slab placed on concrete beams, by expansion connections.] Patent UA, no 201300888, 2013.
7. Koval M. P. *Sposib ankeruvannya stalevogo profilovanogo nastylu u monolitnykh zalizobetonnykh plytakh, vlashtovanykh po zalizobetonnykh balkakh, za dopomogoiu rozpirnykh ta zvarnykh ziednan* [Method of corrugated steel decking anchoring in monolithic concrete slabs, placed on concrete beams, by expansion and welded connections] Patent UA, no u 201306234, 2013.
8. *DBN V.2.3-14-2006. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannya* [State Standard V.2.3-14-2006. Transport constructions. Bridges and pipes. Design rule]. Kyiv, Ministerstvo budivnytstva, arkhitektury i zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Publ., 2006. 359 p.
9. Storozhenko L. *Zalizobetonni konstrukcii v neznimniy opalubtsi* [Reinforced concrete constructions in non-removable formwork]. Poltava, ASMI Publ., 2008. 312 p.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

10. Strakhova N., Golubev V., Kovalov P., Todirika V. *Ekspluatacia i rekonstrukcia mostiv* [Exploitation and reconstruction of bridges]. Kyiv, National Transport University Publ., 2002. 403 p.
11. Biegus A. *Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych wedlug eurokodu*. Wrocław: Politechnika Wroclawska, wydział budownictwa lądowego i wodnego, 2012. 66 s.
12. Budescu M., Ciongradi I., Rogca O. *Theoretical and Experimental Studies of a Class of Steel Roof Profiles*. Computational civil engineering, 2004. Iagi: Editura Societii Academice Matei-Teiu Botez, 2005, p. 155 – 165.
13. Eurocode 4. *Common Unified Rules for Composite Steel and concrete Structures*. European Committee for Standardisation. (CEN) ENV. 1994, I-1:1992. 180 p.
14. Lawson R.M. *Design of Composite Slabs and Beams with Steel Decking*. SCI, Ascot, Berkshire, 1989. 124 p.
15. Nelson. *Standardkatalog Bolzenschweißen*. Gevelsberg, Nelson Bolzenschweiß-Nechnik GmbH & Co. KG, 2001. 35 s.
16. United States Pat. 6578343, Int. Cl.7 E04C 2/32; E04B 5/04; E04B 5/00; E04F 13/04; E01D 19/12. *Reinforced concrete deck structure for bridges and method of making same* / Fred Dumler, Richard L. Lawrence (United States, Pipe Service, Inc).

Стаття рекомендована до публікації д. т. н., проф. С. В. Прохоренком (Україна), д.т.н., проф. М. І. Нетесою (Україна).

Надійшла до редколегії 08.09.2016.

Прийнята до друку 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21-027.45/.049.5

А. И. ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО*

* Кафедра «Мосты и туннели», Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, Киев, Украина, 01010, тел/факс +38 (044) 280 79 78, эл. почта albert.lantoukh@gmail.com, ORCID 0000-0002-6642-2359

ПРОБЛЕМА НОРМАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ МОСТОВ

Цель. Глобальная цель работы заключается в анализе требований надежности элементов мостов, проектируемых в соответствии с национальными нормами. **Методика.** Теоретическое исследование. **Результаты.** Выполнен анализ регламентаций норм. **Научная новизна.** Сделаны важные обобщения и получены количественные оценки расхода материалов при повышении уровня надежности. **Практическая значимость.** Формируется практический аппарат управления надежностью в процессе проектирования.

Ключевые слова: класс надежности; класс последствий; коэффициент надежности; характеристика безопасности

Введение

Статья посвящена анализу системы управления надежностью проектируемых мостов в соответствии с национальными нормами [3]. Концепция надежности этого документа, основанная на новейших достижениях в теории сооружений европейских ученых, принятая для управления надежностью и ресурсом всех сооружений, в том числе – мостов. В качестве инструмента управления безопасностью выступает классификация сооружений по прогнозу ущерба, вызванного возможным разрушением сооружения – *классы последствий*.

Цель этой публикации – привлечь внимание проектировщиков, строителей, инженеров системы эксплуатации мостов к некоторым различиям в моделях надежности мостов, принятых в Европе и в национальных нормах [3, 4, 5], вызывающих справедливые нарекания среди проектировщиков [7].

Ретроспектива

Понятие класса последствий вызванного возможным разрушением сооружения – весьма новое в теории сооружений, появившееся в национальных нормативных документах 5-6 лет тому назад. Авторами термина «класс последствий» (англ.: «Consequence Class» – CC) были ученые работавшие под эгидой Объеди-

нённого комитета безопасности конструкций – JCSS (Joint Committee on Structural Safety).

Комитет, созданный в 1971 г. по инициативе международных научно – исследовательских организаций в сфере строительства, сегодня объединяет ученых 67 стран мира. Ученые возглавлявшие комитет в разное время Дж. Д. Соренсен, М. Х. Фабер, Й. Ферри-Боржес, Й. Шнейдер, Р. Раквитц, Т. Вроувенвельдер были авторами фундаментального теоретического исследования, названного «Типовая вероятностная модель» (Probabilistic Model Code, 1996) [21, 22, 23], которое стало базисом для разработки европейского стандарта ISO 2394-1998 «Общие принципы оценки надежности строительных конструкций» [20], стандарта ISO 13822 «Основы проектирования конструкций – Техническая оценка эксплуатируемых конструкций» 2003 [19].

Эти документы, излагающие теоретические подходы оценки надежности строительных конструкций, стали в 80-90 гг. платформой управления надежностью в нормах строительного проектирования в странах Европы и в пакете Еврокода [10, 4].

Классификация классов последствий

Аппаратом управления безопасностью мостов является дифференциация надежности элементов, основанная на классификации классов

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

последствий, введенной в стандарте ISO 2394-1998 [20]. В качестве факторов, параметров управления надежностью принято следующее:

- регламентация минимального проектного уровня надежности элементов;
- рекомендованная процедура контроля надежности элементов в процессе проектирования;
- регламентация организационных уровней контроля качества проектных решений, обеспечивающих надежность конструкции;
- рекомендации, направленные на снижение человеческих ошибок при проектировании и строительстве;
- рекомендации по классификации надзора за строительством соответствующих принимаемому уровню надежности элементов.

Предметом анализа в этой статье есть первые два фактора.

Понятие «класс последствий» получило свою нынешнюю трактовку в европейском стандарте ISO 2394-1998 [20] и в заглавном документе Еврокода – EN 1990, 2002 [13] (гармонизированный документ – ДСТУ-Н Б.В.1.2-13:2008 (EN 1990:2002, IDN [4]). Это понятие, термин служит критерием дифференциации надежности и риска строительных объектов. Классы последствий описываются потерей человеческих жизней, экономическими и социальными потерями, ущербом нанесенным окружающей среде вызванным возможным разрушением сооружения.

Приведем определение термина в формулировке стандарте ISO 2394-1998 [20] как описание уровней потерь и ущерба (табл. 1).

Обратим внимание, что для класса последствий СС3 рассматриваются потери человеческой жизни либо экономические, социальные или ущерба для окружающей среды, тогда как для класса СС1 рассматриваются все вероятностные потери одновременно (союз «и» в табл. 1).

Численных критериев категорий потерь «очень большие», «значительные», «малые» ни стандарт ISO 2394-1998 [20] ни Еврокод 1990 [13] не устанавливают. Вероятностные потери классифицируются здесь, следуя чисто лингвистическим определениям.

Понятие категорий потерь были предметом обширных научных исследований и дискуссий в

80-90 годах. Некоторые аспекты этих исследований, относящихся к мостам, приводятся ниже.

Таблица 1

Классификация классов последствий отказа строительных объектов [20]

Класс последствий	Описание
СС3	Значительные последствия – потери человеческой жизни, либо экономические, социальные или ущерб для окружающей среды являются очень большими
СС2	Средние последствия – потери человеческой жизни, экономические, социальные или ущерб для окружающей среды являются значительными
СС1	Незначительные последствия – потери человеческой жизни и экономические, социальные последствия или последствия для окружающей среды являются малыми или не принимаемыми в расчет

Сегодня в практике управления надежностью проектируемых сооружений всех стран Европы класс последствий устанавливается по аналогии с примерами, приведенными в таблицах классификация классов последствий в ISO 2394-1998 [20] или в Еврокоде 1990 [13].

Каждому классу последствий (СС) соответствует класс надежности сооружений RC (Reliability Classes). Процедура определения класса надежности проектируемых сооружений в рамках нормативного документа именуется европейским стандартом ISO 2394-1998 [20] как «дифференциация надежности».

В других терминах [13, 20], «дифференциация надежности» трактуется как меры, направленные на социально-экономическую оптимизацию ресурсов в строительстве, минимизирующие ожидаемые последствия разрушения и стоимость строительных работ.

Классы надежности, соответствующие классам последствий, и рекомендуемые минимальные значения характеристики безопасности по несущей способности зданий и сооружений [13] представлены в табл. 2.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблица 2

Рекомендованные минимальные значения характеристики безопасности по несущей способности

Класс надежности	Минимальные значения характеристики безопасности, β	
	Базовый период в 1 год	*Базовый период в 50 лет
RC3 (CC3)	5,2	4,3
RC2 (CC2)	4,7	3,8
RC1 (CC1)	4,2	3,3

* Вычисление характеристики безопасности для периода отличного от базового выполняется по формуле $\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n$, где Φ – функция нормального распределения; β_1 – характеристики безопасности для базового периода

Мосты. Определение класса последствий

Класс последствий отказа проектируемых мостов по Еврокоду определяется как CC2 и, следовательно, принимается надежность класса RC2. Сегодня это общепринятая практика в странах Европы [10, 11, 12, 17], США [9], Южной Кореи [24], Гонконга [29].

В начале этого столетия в мире было опубликовано тысячи исследований, посвященных определению класса последствий автодорожных и железнодорожных мостов. Ниже мы приводим выдержки из некоторых публикаций, обосновывающих тот факт, что в рамках Еврокода и нормах многих стран мира, рассматриваются мосты *только класса последствий CC2*.

Центральной научной идеей исследований был тезис о том, что мосты класса последствий CC3 составляют категорию уникальных сооружений, к которым предъявляются требования надежности класса RC3 и должны проектироваться по специальным техническим условиям.

Это положение сегодня стало принятым, например, в стандарте Великобритании BS EN 1990:2002+A1: 2005. National annex for EN 1990 (Национальное приложение к EN 1990) [11] находим: «для уникальных мостов (таких как подвесные, вантовые, мостов с пролетами более 150 м) и других уникальных сооружений

класса надежности RC3 необходимые проектные решения, обеспечивающие такой уровень надежности, должны определяться специальными техническими условиями». (For special bridges (such as suspension bridges, cable stayed bridges, and bridges with span exceeding 150 m) and landmark structures in RC3, the required measures to achieve this reliability level shall be determined on a project-specific basis.)

Для систематизации последствий по фактору опасности здоровью и жизни людей обратимся к истории аварий мостов в мире. Так, в работе [18] показано, что в 27 авариях фиксируется один случай 225, три случая 69...91; остальные меньше 50 пострадавших.

В современной истории, за последние 15 лет зарегистрировано в мире (без постсоветских стран) 37 аварий мостов [6], в них среднее количество пострадавших (погибших и раненых), составило 49 чел., два случая максимального количества пострадавших 355 и 306 и два случая пострадавших более 100...139 и 114 человек. Эти данные позволяют утверждать, что по фактору опасности здоровью и жизни людей не следует причислять мосты ни к классу последствий CC2 ни CC3 тем более. В других терминах – мосты относятся к категории сооружений с «экономической ответственностью».

Мосты. Материальные и социальные потери

Прямые материальные потери складываются из балансовой стоимости разрушенного сооружения, затрат на реконструкцию/восстановление, затрат на очистку территории от разрушенных элементов, затрат на ввод нового сооружения в эксплуатацию.

Социальные потери включают страховые расходы, потери, связанные со снижением функциональности транспортной сети, затраты, вызванные удлинением маршрута и задержками транспорта, дополнительными расходами на управление движением, потери бизнеса и, наконец, потери репутации маршрута.

Класс последствий CC3. В соответствии с европейскими нормативными документами [13, 20] к классу CC3 относятся мосты риск материальных и социальных потерь или угроза для окружающей среды являются очень большим (economic, social or environmental consequences very great [11, 18], таб. 1). Многочисленные исследования, выполненные в последние

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

15-20 лет, показывают, что по фактору материальных, социальных и экологических потерь к классу СС3 относятся уникальные мосты, такие, например, как вантовые больших пролетов, подвесные, большие мосты на безальтернативных путях сообщения [1, 15, 16, 17, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. Начальная средняя стоимость мостов класса СС3 на порядок или два выше мостов класса СС2.

В обширном отчете, выполненном группой исследователей США под эгидой Федеральной администрации автомобильных дорог (Federal Highway Administration – FHWA) [9] посвященном анализу проектируемых и существующих мостов в Европе, подчеркивается «Подавляющее большинство мостов относятся к классу СС2 и относить к классу СС3 возможно только выдающиеся мосты, разрушение которых может привести к очень тяжелым последствиям (*«possibility only for bridges with very high consequences of failure»*).

Заметим, что речь идет о тяжелых последствиях, сопоставимых с аварией атомной электростанции. Именно атомная электростанция приводится как пример сооружения класса СС3 в европейских стандартах [13].

В работе [12] приводится пример моста класса СС3 в Европе. Это транспортный переход в Дании через пролив, соединяющий острова Фюн и Зеландия, состоящий из двух мостов и тоннеля. Один из мостов - Большой Белт Восточный (Great Belt East Bridge) общей длиной 6,8 км имеет центральный пролет в 1624 м. Стоимость сооружения моста 4,8 миллиардов евро в ценах 2002 г. (115 миллиардов грн. в ценах 2015 г.)

Еще один показательный пример определения класса последствий приведем из исследования профессора Сеульского Национального университета С. Х. Ли (Lee, Seung Han; Seoul National University) и коллег посвященного дифференциации надежности в проектировании мостов больших пролетов подвесных систем [24]. Требования минимальной надежности для мостов подвесных систем из этой работы приводятся ниже в табл. 3.

Таким образом, приведенный краткий анализ публикаций демонстрирует обоснование того, что в рамках Еврокода рассматриваются мосты только класса последствий СС2 как проектируемые, так и находящиеся в эксплуатации.

Таблица 3

Классы последствий сооружений [20]

Уровень последствий	Примеры зданий и сооружений	Надежность, β (границное состояние по прочности)	Класс последствий (по EN 1990)
Высокий	Гражданские здания. Типовые мосты, мосты подвесных систем	3,72 ($P_F = 10^{-4}$)	СС2
Очень высокий	Уникальные мосты подвесных систем	4,00 ($P_F = 3,16 \cdot 10^{-5}$)	Средне-геометрическое между СС2 и СС3

Процедура контроля надежности элементов в процессе проектирования

Для контроля надежности Еврокодом [13] рекомендуется простой и прозрачный алгоритм, известный нашему инженеру с курса строительной механики (см., например, А. Р. Ржаницын «Строительная механика» [8]) и приведенный в национальных нормативных документах пакета «Мосты и трубы» [2]. Вкратце, рекомендованный алгоритм состоит в следующем.

Заданный уровень надежности обеспечивается соблюдением неравенства

$$\beta \geq \beta_{nom}, \quad (1)$$

где β – значение характеристики безопасности вычисленное относительно проектируемого элемента; β_{nom} – минимальное значение характеристики безопасности, соответствующее уровню надежности RC2.

Характеристика безопасности вычисляется по формуле:

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}, \quad (2)$$

где μ_G и σ_G – первые моменты распределения (математическое ожидание и стандарт) функции граничного состояния; μ_G – среднее зна-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

чение обобщенного сопротивления элемента; μ_E – среднее значение обобщенной нагрузки элемента сооружения; σ_G – среднее квадратичное отклонение (стандарт) обобщенного сопротивления элемента сооружения; σ_E – среднее квадратичное отклонение обобщенной нагрузки элемента сооружения.

В практических расчетах Еврокод [1, 13] рекомендует воспользоваться зависимостью эквивалентной вероятности отказа, записанной через параметры нормального (или логнормального) закона распределения:

$$\mu_E - \alpha_E \beta \sigma_E \leq \mu_R - \alpha_R \beta \sigma_R, \quad (3)$$

где коэффициенты чувствительности α_E и α_R вычисляются через стандарты σ_E и σ_R . Что касается коэффициентов надежности, зависящих от уровней контроля качества проектных решений и человеческих ошибок при проектировании и строительстве, то они для класса надежности RC2, принимаются равными 1,0.

Оценка материальных затрат

Здесь выполним грубую оценку роста материальных затрат исходя из анализа коэффициентов надежности модели сопротивления и модели нагрузки, соответствующие двум классам ответственности: CC2 и CC3.

Определим коэффициенты надежности, соответствующие двум уровням надежности – RC2 (класс ответственности: CC2) и RC3 (класс ответственности: CC3). По определению, коэффициент надежности модели сопротивления вычисляется как отношение характеристического значения переменной к расчетному:

$$\gamma_R = R_k / R_d, \quad (4)$$

где R_k – характеристическое значение обобщенного сопротивления элемента и R_d – расчетное значение обобщенного сопротивления элемента, γ_R – коэффициент надежности элемента.

Характеристическое значение R_k и расчетное значение R_d в случае логнормального распределения [4, 13, 20] определяются следующим образом:

$$R_k = \mu_R \cdot \exp(-1,645 \cdot V_R); \quad (5)$$

$$R_d = \mu_R \cdot \exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R), \quad (5a)$$

где μ_R – среднее значение переменной сопротивления R , V_R – коэффициент вариации элемента, α_R – коэффициент чувствительности (направляющий косинус), $\alpha_R = 0,8$.

Внесем (5) и (5a) в соотношение (4) получим:

$$\begin{aligned} \gamma_R &= \exp(-1,645 \cdot V_R) / \exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R) = \\ &= \exp(\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R - 1,645 \cdot V_R). \end{aligned} \quad (6)$$

Для определенности будем рассматривать изгибаемые железобетонные элементы. Статистическая модель переменных сопротивления представлена в табл. 4.

Таблица 4

Статистическая модель переменных сопротивления

Переменная	Распределение	Коэффициенты вариации
Арматура преднапряженная	Логнормальное	0,07; 0,09; 0,11
Сжатый бетон в условиях природного твердения	Логнормальное	0,066; 0,082; 0,105;

Коэффициент вариации элемента в формулах (5) и (5a) вычисляется по общему правилу математической статистики:

$$V_R = (V_C^2 + V_S^2 + V_C^2 V_S^2)^{0,5}, \quad (7)$$

где V_C – коэффициент вариации бетона; V_S – коэффициент вариации арматуры.

Вычисленные по формуле (4) коэффициенты надежности, соответствующие минимальным и максимальным значениям коэффициентов вариации, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Коэффициенты надежности модели сопротивления

Класс надежности	Минимальные значения, γ_R	Максимальные значения, γ_R
RC2	1,144	1,189
RC3	1,237	1,315

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Коэффициенты надежности модели нагрузки

Формула определения коэффициентов надежности модели сопротивления (4) применяется для модели нагрузки как обратная:

$$\gamma_{Ei} = E_d / E_k, \quad (4a)$$

где γ_{Ei} – коэффициент надежности по нагрузке.

Распределение внешней нагрузки принимается нормальным для постоянной нагрузки и Гумбеля для подвижной нагрузки.

Постоянная нагрузка

Характеристическое значение нагрузки E_k и расчетное E_d в этом случае определяются зависимостями:

$$E_d = \mu_{Ei}(1 - \alpha_E \cdot \beta \cdot V_{Ei}); \quad (8)$$

$$E_k = \mu_{Ei}, \quad (8a)$$

где μ_{Ei} – среднее значение i -й переменной нагрузки R , V_R – коэффициент вариации элемента, α_E – коэффициент чувствительности (направляющий косинус), $\alpha_E = -0,7$.

$$\gamma_{Ei} = (1 - \alpha_E \cdot \beta \cdot V_{Ei}) \quad (9)$$

Подвижная нагрузка

Характеристическое значение подвижной нагрузки E_k и расчетное E_d определяются зависимостями:

$$E_k = \mu_{Ei}(1 - V_{Ei}(0,45 + 0,78 \ln(-\ln(0,98))))), \quad (10)$$

$$E_d = \mu_{Ei}(1 - V_{Ei}(0,45 + 0,78 \ln(-\ln(\Phi^{-1}(\alpha_E \beta))))), \quad (11)$$

где Φ – стандартная функция нормального распределения. Статистическая модель переменных нагрузки представлена в табл. 6.

Вычисляется два коэффициента надежности модели нагрузки: γ_{E1} – временной подвижной нагрузки и γ_{E2} – постоянных нагрузок. Соответствующие коэффициенты вариации вычисляются по формулам (9) и (10):

$$V_{E1} = (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_1^2 V_2^2 + V_1^2 V_3^2 + V_2^2 V_3^2)^{0,5}, \quad (12)$$

$$V_{E2} = (V_4^2 + V_5^2 + V_4^2 V_5^2)^{0,5}. \quad (13)$$

Обозначения коэффициентов вариации приведены в табл. 6. Полученные коэффициенты вариации приведены в табл. 7.

Таблица 6

Статистическая модель переменных нагрузки

Переменная	Распределение	Коэффициенты вариации	
		Обозначение	Значение
Подвижная нагрузка АК полосовая	Гумбеля	V_1	0,24
Тандем нагрузки АК	Гумбеля	V_2	0,07
Толпа на тротуаре	Гумбеля	V_3	0,14
Постоянная нагрузка проезжей части и тротуаров	Нормальное	V_4	0,17
Собственный вес железобетонной конструкции	Нормальное	V_5	0,033

Таблица 7

Коэффициенты вариации модели нагрузки

Временная подвижная нагрузка	Постоянная нагрузка
$V_{E1} = 0,289$	$V_{E2} = 0,173$

Вычисленные по формулам (4a), (10), (11) коэффициенты надежности нагрузки, соответствующие коэффициентам вариации (см. табл. 6), представлены в табл. 8.

Таблица 8

Коэффициенты надежности модели нагрузки

β	γ_1	γ_2	γ_3
3,80	1,46	1,22	1,35
4,30	1,52	1,36	1,50

Здесь γ_1 – коэффициент надежности постоянной нагрузки; γ_2 – коэффициент надежности временной подвижной нагрузки (АК); γ_3 – коэффициент надежности временной нагрузки от толпы.

Обобщенный коэффициент надежности нагрузки получим как среднегеометрическое трех коэффициентов – постоянной нагрузки, временной подвижной нагрузки и временной нагрузки от толпы:

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$\gamma_E = (\gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3)^{1/3}. \quad (14)$$

Вычисленные по формуле (11) значения обобщенного коэффициента надежности нагрузки, соответствующие классам надежности RC2 и RC3 приведены в табл. 9.

Таблица 9

Коэффициенты надежности				
	β	γ_R	γ_E	Π
RC2	3,8	1,19	1,34	1,60
RC3	4,3	1,32	1,44	1,90

Нижнюю относительную оценку материальных затрат получим из уравнений граничного состояния *постоянной высоты* сечения по моменту:

$$\Pi_2 \cdot M_{cr} = M_{r2}; \quad (15)$$

$$\Pi_3 \cdot M_{cr} = M_{r3}, \quad (15a)$$

где M_{cr} – характеристический момент в сечении от всех нагрузок; M_{r2} , M_{r3} – граничные моменты (несущая способность) сечений, соответствующих классам надежности RC2 и RC3; Π_2 , Π_3 – произведения двух коэффициентов табл. 9 соответствующих классам надежности RC2 и RC3.

Из зависимостей (15 и 15a) относительный рост материальных затрат (по арматуре):

$$\xi = M_{r3}/M_{r2} = \Pi_3/\Pi_2 = 1,90/1,60 = 1,19. \quad (16)$$

Таким образом, в случае применения европейских норм, минимальная нижняя оценка роста материальных затрат (по арматуре) для изгибаемых железобетонных элементов мостов составляет 19 %. С учетом необходимого увеличения объема железобетона общие минимальные затраты возрастают до 35...38 %.

Национальные нормы управления безопасностью сооружений [3] требуют дополнительно введения, так называемых, «коэффициентов ответственности» В табл. 10 приведены коэффициенты надежности, соответствующие классам RC2 и RC3 (табл. 9) дополненные коэффициентами ответственности украинских норм [3] – γ_0 .

Тогда нижняя оценка роста материальных затрат (по арматуре) составит:

$$\xi = \Pi_3/\Pi_2 = 2,28/1,68 = 1,36,$$

и, с учетом необходимого увеличения объема железобетона, общие минимальные затраты возрастают до 50...55 %.

Таблица 10

Свод коэффициентов надежности

	β	γ_R	γ_E	γ_0	Π_i
RC2	3,8	1,19	1,34	1,05	1,68
RC3	4,3	1,32	1,44	1,20	2,28

Заканчивая этот анализ, подчеркнем, что установление минимального уровня надежности не является самоцелью – это, прежде всего, базис инструмента для определения коэффициентов надежности нагрузочных эффектов и материалов в рамках соответствующих разделов норм. А с другой стороны – сами коэффициенты надежности выполняют в проектировании не только функции оценки безопасности сооружения, но выступают мерилем материальных затрат.

Выводы

1. Европейская система управления надежностью проектируемых строительных объектов основана на положениях международного стандарта ISO 2394-1998 «Общие принципы оценки надежности строительных конструкций» [20]. Центральным местом стандарта есть аппарат дифференциации надежности, определяющий минимальный уровень надежности проектируемых конструкций с помощью понятия «класс последствий» (CC). Каждому классу последствий соответствует класс надежности сооружений (RC).

Концепция надежности в Еврокоде целиком и полностью совпадает с требованиями стандарта ISO 2394-1998.

2. Мосты, проектируемые в рамках Еврокода, относятся к классу последствий CC2 и, следовательно, минимальная проектная надежность принимается класса RC2.

3. Уникальные мосты больших пролетов, мосты на безальтернативных путях сообщения могут проектироваться в соответствии с уровнем надежности класса RC3. Для этого заказчиком должны быть составлены специальные технические условия.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

4. Обращает на себя внимание тот факт, что в Европейской системе надежностью определение класса последствий проектируемых мостов не является прерогативой проектировщика и устанавливается нормами проектирования.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гульванесян, Х. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 1990 : Основы проектирования сооружений [Текст] : пер. с англ. В. Д. Райзер, Н. А. Попов / Х. Гульванесян, Ж.-А. Калгаро, М. Голицки. // Мин-во образования и науки Росс. Федерации. ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». Серия «Издано в МГСУ: Еврокоды» – Москва : МГСУ, 2011. – 258 с.
2. ДБН В.1.3-22:2009 Споруди транспорту. Мости і труби. Основні вимоги проектування [Текст]. – Надано чинності 2009-11-11. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 73 с.
3. ДБН В.1.2-14:2009 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – Надано чинності 2009-12-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 36 с.
4. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008 (EN 1990:2002, IDN). Система надійності та безпеки у будівництві. Настанова. Основи проектування конструкцій. [Текст]. – Надано чинності 2009-07-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 80 с.
5. ДСТУ-Н Б В.1.2-16:2013 Визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва [Текст]. – Надано чинності 2013-09-01. – Київ : Мінірегіонбуд України, 2013. – 49 с.
6. Вікіпедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_bridge_failures
7. Пшінько, П. О. Аналіз сучасного порядку розробки, узгодження проектної документації, отримання дозволу на будівельні роботи та здачі в експлуатацію лінійних об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури залізничного транспорту України [Текст] / П. О. Пшінько, В. В. Марочка, В. В. Ковальчук, І. В. Калашніков, А. В. Гуменюк // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2014. – Вип. 6. – С. 109-118.
8. Ржаницын, А. Р. Строительная механика [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. Р. Ржаницын. – Москва : Высш. школа, 1982. – 400 с.
9. AASHTO Manual for Bridge Evaluation. 2008.
10. Assuring Bridge Safety and Serviceability in Europe. International Technology Scanning Program, 2010. Available at: <http://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl10014/pl10014.pdf>.
11. BS EN 1990:2002+A1:2005. National annex for EN 1990.
12. Diamantidis, D. Probabilistic Assessment of Existing Structures. Joint Committee on Structural Safety, RILEM Publications S.A.R.L., 2001.
13. EN 1990:2002 Eurocode – Basis of structural design. European Committee for Standardization. Brussels: 2003.
14. Faber M., Khbler O, Fontana M., Knobloch M. Failure Consequences and Reliability Acceptance Criteria for Exceptional Building Structures. July 2004. Zurich: Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology.
15. Federal Emergency Management Agency (FEMA), HAZUS-MH MR3 Technical Manual, Washington D.C. (accessed on April 30, 2011). Available at: <http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/>
16. Ferry-Borges J., Castanheta M. Structural Safety. Laqboratorio Nacional de Engenharia Civil. Lisbon, 1971.
17. Gulvanessian H., Calgaro J.A, Holicky M. Designer's Guide to EN 1990, Eurocode : Basis of structural Design. Thomas Telford, London, 2002, ISBN: 07277 3011 8
18. Imam B., Chryssanthopoulos M. Bridge Failure Consequences. Robustness of Structures : Final Conference, COST Action TU0601 (Prague, 30-31 May, 2011).
19. ISO 13822-2010. Bases for design of structures – Assessment of existing structures. Geneve, Switzerland, 2010.
20. ISO 2394. General principles on reliability for structures. 2nd edn. Geneve, Switzerland, 1998.
21. JCSS. Probabilistic Model Code. Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001.
22. JCSS. Background documentation, Part 1 of EC 1 Basis of design, 1996.
23. JCSS. Probabilistic model code. (2001). JCSS working materials. Available at: <http://www.jcss.ethz.ch/>
24. Lee Seung Han at al. Differentiation of Target Reliability and Design Life in Design of Long-span Cable-supported Bridges. 37th Madrid IABSE Symposium, 2014.
25. Reference Guide for Applying Risk and Reliability – Based Approaches for Bridge Scour Prediction, 2012.
26. Schneider J. Introduction to Safety and Reliability of Structures. IABSE. Zurich, 1997.
27. Sørensen J. D. Reliability Based Optimization of Structural Systems. Proceedings of the 13th IFIP conference, 1987, vol. 113.
28. Sørensen J. D., Kroon I. B., Faber M. H. Optimal Reliability-Based Code Calibration. Structural Safety, 1994, vol. 14, pp. 197-208.
29. Structures design manual for highways and railways. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Hong Kong, 2013.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

30. Sykora M., Holicky M., Markov J. Target reliability levels for assessment of existing structures, In: Proc. ICASP11 (1-4 August, 2011) CRC Press/Balkema, pp. 1048-1056.
31. Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2012) Target reliability as a function of the design working life. 6th International Forum on Engineering Decision Making. (January 26-29, 2012). Lake Louise. Canada, 2012.

A. I. ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО*

* Кафедра «Мости та тунелі», Національний транспортний університет, вул. Суворова 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (095) 274 80 25, ел. пошта albert.lantoukh@gmail.com, ORCID 0000-0002-6642-2359

ПРОБЛЕМА НОРМАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ МОСТІВ

Мета. Глобальна мета роботи полягає в аналізі вимог надійності елементів мостів, що проектуються згідно з національними нормами. **Методика.** Теоретичне дослідження. **Результати.** Виконано аналіз регламентацій норм. **Наукова новизна.** Зроблено важливі узагальнення та отримані кількісні оцінки витрат матеріалів при підвищенні рівня надійності. **Практична значимість.** Формується практичний апарат управління надійністю в процесі проектування.

Ключові слова: клас надійності; клас наслідків; коефіцієнт надійності; характеристика безпеки

A. I. LANTOUKH-LYASHENKO*

* Department of «Bridges and Tunnels», National Transport University, 1 Suworov, St., Kiev, Ukraine, 01010, tel. +38 (095) 274 80 25, e-mail albert.lantoukh@gmail.com, ORCID 0000-0002-6642-2359

MANAGEMENT SYSTEM DESIGNED BRIDGES

Purpose. The global objective of the work is to analyze the elements of the safety requirements of bridges designed in accordance with national regulations. **Methodology.** Theoretical study. **Findings.** The analysis of regulations standards. **Originality.** Important generalizations and the quantitative assessment of material consumption while increasing reliability were made. **Practical value.** Practical reliability management tool in the design process is formed.

Keywords: safety class; the consequences class; safety coefficient; reliability index

REFERENCES

1. Gulvanesyan Kh., Kalgaro Zh.-A., Golitski M. *Rukovodstvo dlya proektirovshchikov k Yevrokodu 1990: Osnovy proektirovaniya sooruzheniy* [Designers' Guide to Eurocode 1990: Basic of Structural Design]. Izdano v MGSU : Yevrokody – Published in MSUCE : Eurocodes. Moscow, MGSU Publ., 2011. 258 p.
2. *DBN V.2.3-22-2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannya* [State Standard V.2.3-22-2009. Transport constructions. Bridges and pipes. Basic design requirements]. Kyiv, Minrehionbud Ukrayiny Publ., 2009. 73 p.
3. *DBN V.1.2-14-2009. Systema zabezpechennya nadijnosti ta bezpeky budivelnyx obyektiv. Zagalni pryncypy zabezpechennya nadijnosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel, sporud, budivelnyx konstrukcij ta osnov* [State Standard V.1.2-14-2009 System reliability and safety of construction projects. General principles of reliability and structural safety of buildings, structures and foundations]. Kyiv, Minrehionbud Ukrayiny Publ., 2009. 36 p.
4. *DSTU-N B V.1.2-13:2008 (EN 1990:2002, IDN). Systema nadiinosti ta bezpeky u budivnytstvi. Osnovy proektuvannya konstruktsii* [State Standard B.V.1.2-13:2008. System reliability and safety in construction. Attitude. Basis of structural design]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy, Publ., 2009. 80 p.
5. *DSTU-N B.V.2.3-23-2013. Sporudy transportu. Nastanova z otsinyuvannya i prognozuvannya tehnichnogo stanu avtodorozhnykh mostiv* [State Standard B.V.2.3-23-2013. Transport constructions. Guidance evaluation and forecasting technical condition of road bridges]. Kyiv, Minrehionbud Ukrayiny Publ., 2013. 49 p.
6. *Vikipediya* [Wikipedia]. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_bridge_failures
7. Pshinko P. O., Marochka V. V., Kovalchuk V. V., Kalashnikov I. V., Humeniuk A. V. Analiz suchasnoho poriadku rozrobky, uzgodzhennia proektnoi dokumentatsii, otrymannia dozvolu na budivelni roboty ta zdachi v ekspluatatsiyu liniinykh obyektiv inzhenerno-transportnoi infrastruktury zaliznychnoho transportu Ukrainy [Analysis of the modern sequence of development, coordination of project documentation, obtaining

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- permission on construction works and commissioning of linear objects of engineering and transport infrastructure of railway transport of Ukraine]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2014, issue 6, pp. 109-118.
8. Rzhanytsyn A. R. *Stroitel'naya mekhanika* [Structural mechanics]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1982. 400 p.
 9. AASHTO *Manual for Bridge Evaluation*. 2008.
 10. Assuring Bridge Safety and Serviceability in Europe. *International Technology Scanning Program*, 2010. Available at: <http://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl10014/pl10014.pdf>.
 11. *BS EN 1990:2002+A1:2005. National annex for EN 1990*.
 12. Diamantidis D. *Probabilistic Assessment of Existing Structures*. Joint Committee on Structural Safety, RILEM Publications S.A.R.L., 2001.
 13. *EN 1990:2002 Eurocode – Basis of structural design*. European Committee for Standardization. Brussels: 2003.
 14. Faber M., Failure H., Khbler O., Fontana M., Knobloch M. *Failure Consequences and Reliability Acceptance Criteria for Exceptional Building Structures*. (July 2004). Zurich: Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology.
 15. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *HAZUS-MH MR3 Technical Manual*, Washington D. C. (April 30th, 2011). Available at: <http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/>
 16. Ferry-Borges J., Castanheta M. Structural Safety. *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*. Lisbon, 1971.
 17. Gulvanessian H., Calgaro J.-A., Holicky M. *Designers Guide to EN 1990. Eurocode : Basis of structural Design*. London, Thomas Telford Publ., 2002, ISBN: 07277 3011 8
 18. Imam B., Chrysanthopoulos M. Bridge Failure Consequences. *Final Conference “Robustness of Structures (Prague, 30-31 May, 2011)”*, COST Action TU0601.
 19. *ISO 13822-2010. Bases for design of structures – Assessment of existing structures*. Geneva, Switzerland, 2010.
 20. *ISO 2394. General principles on reliability for structures*. 2nd edn. Geneva, Switzerland, 1998
 21. *JCSS. Probabilistic Model Code*. Zurich, Joint Committee on Structural Safety Publ., 2001.
 22. *JCSS. Background documentation*. Part 1 of EC 1 Basis of design, 1996.
 23. *JCSS. Probabilistic model code*. (2001). JCSS working materials. Available at: <http://www.jcss.ethz.ch/>
 24. Lee Seung Han et al. Differentiation of Target Reliability and Design Life in Design of Long-span Cable-supported Bridges. *37th Madrid IABSE Symposium, 2014*.
 25. *Reference Guide for Applying Risk and Reliability – Based Approaches for Bridge Scour Prediction*, 2012.
 26. Schneider J. *Introduction to Safety and Reliability of Structures*. IABSE. Zurich, 1997.
 27. Sørensen, J. D. Reliability Based Optimization of Structural Systems. *Proceedings of the 13th IFIP conference*, 1987, vol. 113.
 28. Sørensen J. D., Kroon I. B., Faber M. H. *Optimal Reliability-Based Code Calibration*. Structural Safety Publ., 1994, vol. 14, pp. 197-208.
 29. Structures design manual for highways and railways. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Hong Kong, 2013.
 30. Sykora M., Holicky M., Markov J. Target reliability levels for assessment of existing structures, *In: Proc. ICASP11 (1-4 August, 2011)* CRC Press, Balkema, pp. 1048-1056.
 31. Vrouwenvelder A.C.W.M. Target reliability as a function of the design working life. *6th International Forum on Engineering Decision Making (January 26-29, 2012)*. Lake Louise, Canada, 2012.

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна), д.т.н, проф. В. В. Кулябко (Україна).

Поступила в редколлегию 26.10.2016.

Принята к печати 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.072.2.012.45:620.193/.199

Й. Й. ЛУЧКО¹, Б. Л. НАЗАРЕВИЧ², І. Б. КРАВЕЦЬ^{3*}

¹ Кафедра «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Іванни Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, ел. пошта lychko.diit@mail.ru

² Кафедра будівельного виробництва, Інститут будівництва та інженерії довкілля, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Карпінського 6, 2-ий корпус, к.419, Львів, Україна, 79013, ел. пошта bnazar@polynet.lviv.ua

^{3*} Кафедра «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Іванни Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, ел. пошта kravetsivan@mail.ua

ВІДНОВЛЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ПОШКОДЖЕНИХ КОРОЗІЄЮ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНОГО ВУЗЛА ПІДІЗДНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ШЛЯХУ

Мета. Оцінка стану несучих конструкцій будівлі та розробка рішень для подальшої її безпечної експлуатації **Методика.** Авторами опрацьовані технології та матеріали, які дають надійні результати ремонтно-відновлювальних робіт до проектних показників міцності та надійності залізобетонних конструкцій застосовуючи в тому числі ін'єкційні методи та матеріали. Зокрема, посилення монолітних залізобетонних конструкцій. **Наукова новизна.** Під час дослідження встановлено що причиною зменшення міцності бетону згідно з теорією залізобетону спричинило за собою зменшення несучої здатності залізобетонних балок і плит перекриття. **Практична значимість.** Для посилення відновлених балок було запропоновано застосування композитних матеріалів: стрічки та мати з вуглецевого волокна.

Ключові слова: несучі конструкції; ремонтно-відновлювальні роботи; надійність; ін'єкційні методи; монолітні залізобетонні конструкції; стрічки; вуглецеве волокно

Проблема

Бетонні та залізобетонні конструкції завдяки численним перевагам широко застосовують у будівлях і спорудах і в даний час. Незважаючи на те, що об'єми збірного виробництва залізобетону за останні роки дещо зменшились, а монолітного навпаки.

Проте існує надзвичайно багато залізобетонних конструкцій як збірного так і монолітного залізобетону, введених в експлуатацію за попередні роки. Переважна більшість бетонних та залізобетонних елементів будівельних конструкцій зазнають постійної або тимчасової дії агресивного середовища [1, 2]. Така дія може викликати локальне руйнування та вихід з ладу будівлі чи споруди. Отже, збереження та відновлення міцності та довговічності таких конструкцій є актуальною проблемою. Однією з найнебезпечніших є корозія від дії кислот, оскільки вона динамічніша за інші.

Аналіз останніх досліджень

На сьогодні корозійні процеси в цементному камені та бетоні під дією кислотного середовища вивчені достатньо [1-6]. Встановлено, що вони руйнуються внаслідок хімічних реакцій кислот зі складниками цементного каменю, які порушують структуру бетону. Майже у всіх експериментах вивчали корозію бетону не беручи до уваги вплив зовнішнього навантаження [5, 6]. Однак, у розрахункових співвідношеннях значення коефіцієнтів дифузії приймають однаковими у деградованій і не деградованій зонах а також врахування зміни густини бетону і його пористості. На ці недоліки вказано у праці [6]. Основні методики кількісної оцінки впливу агресивного середовища на міцність і ресурс елементів будівельних конструкцій базуються на розвитку глибини корозійної деградації бетону та зміні, внаслідок корозії, його механічних характеристик [1].

Методика визначення навантаження тріщиноутворення для оцінки корозійної тривкості залі-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

зобетонних конструкцій наведені у праці [7]. Однак, у літературі недостатньо висвітлені деякі аспекти про вплив агресивних середовищ на розвиток тріщин у бетоні. На нашу думку відсутня оцінка атмосферних впливів на руйнування, особливо за значних перепадів температур при яких відбувається замерзання води у крайових тріщинах із врахуванням характеристик тріщиностійкості бетону, це питання висвітлено у праці [8], але для деяких випадків потребує експериментальних досліджень. Проблеми оцінки впливу фізичних факторів на корозію бетонних та залізобетонних елементів конструкцій добре розглянуті у праці [9]. Основні системи та технології по захисту бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії і вказівки з їх використання добре опрацьовані у праці [10].

Отже, авторами також відпрацьовані технології, та матеріали, які дають надійні результати ремонтно-відновлювальних робіт до проектних показників міцності та надійності залізобетонних конструкцій застосовуючи в тому числі ін'єкційні методи та матеріали. Зокрема, посилення монолітних залізобетонних конструкцій перекриття будівлі в Києві, на Чоколівському бульварі, 42а [11], посилення залізобетонних балок готелю «Дністер» у Львові [2, 3], посилення монолітних залізобетонних ригелів другого і третього поверхів будівлі їдальні фабрики «Зеніт» у м. Тячеві [3]. Ремонтно-ін'єкційне зміцнення залізобетонних каналізаційних колекторів, капітальний ремонт басейну готелю Rixos у м.Трускавці, що описані у праці [3] та інші об'єкти виконані в Україні дають підставу пропонувати ін'єкційні технології та матеріали як вітчизняних так і закордонних виробників, залежно від умов експлуатації об'єкту.

Мета роботи

На підставі матеріалів обстеження та вивчення наявної технічної документації на дану будівлю оцінити стан несучих конструкцій (залізобетонних балок) визначити характер і причини виникнення дефектів і пошкоджень, їх вплив на несучу здатність і експлуатаційний стан і розробити рішення щодо подальшої безпечної експлуатації будівлі.

Для ремонту залізобетонних балок рекомендовано систему наведену у працях [1, 3] – полімер-цементі бетони виробництва фірми PAGEL, яку ми неодноразово застосовували на практиці для вирішення подібних задач. Такі ремонтні системи призначені для виконання комплексних ремонтів різного типу бетонних і залізобетонних конструкцій, в тому числі і конструкцій, які сприймають динамічні навантаження.

У зв'язку зі специфікою полімерно-цементних композицій в значній мірі розширюються області їх використання з можливістю формування кінцевих фізико-механічних характеристик та з корисними при цьому технологічними параметрами (зручністю при укладанні, простотою нанесення, швидкістю тужавіння та ін.).

Технологія ремонту і підсилення залізобетонних балок

Відновлення несучої здатності залізобетонних балок пошкоджених корозією розвантажувального вузла під'їзного залізничного шляху здійснювалось на замовлення адміністрації комбикормового заводу в с. Переяславське, Переяслав-Хмельницького району, Київської області було виконано обстеження та була дана оцінка технічного стану конструктивних елементів, розвантажувального вузла під'їзного залізничного шляху.

Технологічні операції щодо ремонту поверхонь цього об'єкту ми поділили на три етапи: підготовчі роботи; технологія нанесення системи [7]; технологія посилення несучих конструкцій композитними стрічками.

Процедура оцінки несучої здатності залізобетонних балок здійснювалася згідно з існуючими стандартами та нормативними документами [1, 4, 5] та складалася з наступних кроків:

- попереднє обстеження несучих залізобетонних конструкцій вузла, в яке входило: збір та аналіз технічної документації, загальний огляд з оцінкою стану конструкцій і виявлення найбільш зруйнованих (рис. 1, а);

- детальне обстеження яке включало: уточнення обміром перерізів елементів, конструктивних схем навантажень, ескізування дефектів, перевірка параметрів бетону, видача рекомендацій.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА



Рис. 1. Посилення залізобетонних балок пошкоджених корозією:
a – загальний вигляд вузла; *b, c* – стан несучих балок в часі обстеження; *d, e* – відколотих зразків бетону; *f* – загальний вигляд відновленої несучої залізобетонної балки; *g* – посилення відновленої залізобетонної балки вуглецевими стрічками; *h* – анкерування елементів посилення вуглецевих стрічок

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Як показали перевірочні розрахунки, несуча здатність балок є недостатньою, так як втрачені опалубні форми поперечного перерізу балок, а також спостерігається значне кородування робочої арматури та бетону (до 20 %) і втрачені фізико механічні показники балок. На підставі виконаних обстежень та розрахунків балок встановлено, що для подальшої безпечної експлуатації балок необхідно терміново виконати їх ремонт та посилення [1, 6].

Як відомо, якщо в залізобетонній конструкції, що підготовляється до наступного ремонту, зафіксована початкова корозія арматурної сталі (див. рис. 1, *b, c, d, e*), то найрозумнішим буде провести послідовно наступні технологічні операції з підготовки поверхні [7]:

- виявити простукуванням всі порожнини у бетоні з послідовною розчисткою їх зубилом, при цьому потрібно проявити особливу обережність, щоб не пошкодити оголену арматуру (див. рис. 1, *d, e*);

- повністю оголити арматуру, якщо вона прокородована; ділянки сталевих стержнів, що поіржавіли більш ніж на 2/3, слід вирізати і приварити на їх місце нові; несучі елементи армування, що підлягли корозії (наприклад, хомути, арматура для сприймання напружень від усадки бетону), можуть бути видалені без заміни;

- провести піскоструменеву обробку бетонної поверхні; арматурну сталь слід очищати до металічного блиску (ступінь очистки арматури від іржі SA 21/2 відповідно до вимог стандарту DIN 55928); піскоструменева технологія очистки поверхні є найбільш розповсюдженим способом підготовки основи;

- перевірити бетон у місцях руйнування на лужність, наприклад, за допомогою індикаторного розчину на базі фенолфталеїну; бетон з рН9 і менше також підлягає видаленню;

- провести консервацію сталі активним антикорозійним засобом. Заходи щодо консервації сталі можна вважати в цілому завершальними в технологічному процесі підготовки дефектних поверхонь залізобетонних конструкцій до подальшої захисної обробки. При великому об'ємі ремонту пропонується по закінченні цієї стадії організувати проміжний прийом виконаних робіт.

Автори звертають увагу на систему ремонту та відновлення бетонних та залізобетонних конструкцій під назвою РСС (Polymer Cement Concrete) –

полімерно-цементні бетони, яка наведена в праці [1] та перевірена і успішно застосовується при ремонті несучих залізобетонних конструкцій різного призначення [1, 10, 11, 12]. Тут слід зазначити основні переваги такої системи:

- ремонтна система на мінеральній основі дозволяє виконання робіт в умовах зволоженої основи, що в свою чергу, недопустимо при застосуванні системи РС (Polymer Concrete) – бетону на основі смол;

- продукти системи мають значну міцність на динамічні навантаження, в тому числі з ударним характером;

- мінімальна питома усадка в часі твердіння ремонтних розчинів системи (нижче 1 проміле через 28 днів);

- продукти системи є атмосферостійкими і стійкими до безпосередніх впливів середовищ в тому числі солей, характеризуються повною водо непроникливістю і дифузійністю, володіють великим карбонізаційним опором, завдяки чому допомагають продовженню терміну експлуатації конструкцій;

- відремонтовані поверхні можна повністю навантажувати транспортним або пішохідним рухом вже через 24 години після завершення ремонту;

- основні продукти системи доставляються у вигляді сухої суміші, яка призначена для замішування водою. Тому приготування готової ремонтної маси вимагає тільки дотримання умов дозування води та відповідного перемішування механічною мішалкою на малих обертах. Загальна схема системи РСС представлена на рис. 2.

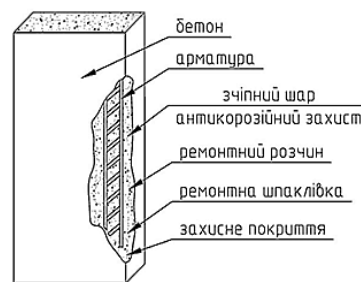


Рис. 2. Загальна схема системи РСС

Технологічні операції щодо застосування системи ремонту та відновлення бетонних та залізобетонних конструкцій детальніше описані в працях [1, 3].

Таким чином до системи відновлення залізобетону входить п'ять найменувань матеріа-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

лів, які використовують у різних комбінаціях залежно від потреб [7]. Після відновлення залізобетонних балок виконуємо їх посилення композитними матеріалами згідно виконавчих схем представлених на рис. 3.

Висновки

1. На підставі дослідження встановлено що причиною зменшення міцності бетону згідно з теорією залізобетону спричинило за собою зменшення несучої здатності залізобетонних балок і плити перекриття.

2. Для посилення та ін'єкційного заповнення сухих тріщин, розшарувань та інших пошкоджень у залізобетонних балках та плитах потрібно застосовувати компактні (нездатні до спінення) текучі поліуретанові композиції.

3. Виходячи з матеріалів обстеження [16] реального стану несучих залізобетонних балок було запропоновано застосувати ремонтну систему наведену в [1, 3].

4. Для посилення відновлених балок було запропоновано застосування композитних матеріалів (стрічки та мати з вуглецевого волокна).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лучко, Й. Й. Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних та залізобетонних конструкцій і споруд [Текст] / Й. Й. Лучко, І. І. Глагола, Б. Л. Назаревич. – Львів : Каменяр, 1999. – 229 с.
2. Москвин, В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты [Текст] / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев; под общ. ред. В. М. Москвина. – Москва : Строиздат, 1980. – 536 с.
3. Лучко, Й. Й. Методи захисту від корозії залізобетонних конструкцій і споруд [Текст] / Й. Й. Лучко, Б. З. Парнета, Б. Л. Назаревич / МОН України, Дніпропетровський нац. ун-т ім. акад. В. Лазаряна. – Львів : Каменяр, 2016. – 415 с.
4. Маруха, В. І. Ін'єкційні технології відновлення роботоздатності пошкоджених споруд тривалої експлуатації [Текст] / В. І. Маруха, В. В. Панасюк, В. П. Силованюк — Львів : Сполом. – 2009, т. 12 – 262 с.
5. Бліхарський, З. Я. Міцність бетонних елементів під дією агресивного середовища [Текст] / З. Я. Бліхарський, І. І. Глагола, Р. Є. Хміль // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів : Каменяр, 2002. – Вип. 4. – С. 30-37.
6. Гембара, Т. В. Аналітична оцінка корозійної деградації бетону в кислотному середовищі з урахуванням мінімальної концентрації агресивної речовини [Текст] / Т. В. Гембара, Й. Й. Лучко, І. І. Глагола / Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів : Каменяр, 2000. – Вип. 2. – С. 22-27.
7. Лучко, Й. Й. Методи визначення навантаження тріщиноутворення для оцінки корозійної тривалості залізобетонних конструкцій [Текст] / Й. Й. Лучко, Т. В. Гембара // Діагностика довговічності та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів : Каменяр, 2004. – Вип. 6. – С. 59-64.
8. Лучко, Й. Й. Розвиток заповненої льодом крайової тріщини в бетоні при довготривалих згинальних навантаженнях [Текст] / Й. Й. Лучко, Т. В. Гембара // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів : Каменяр, 2003. – Вип. 5. – С. 123-127.
9. Лучко, Й. Й. Проблеми оцінки впливу фізичних факторів на корозію бетонних та залізобетонних елементів конструкцій [Текст] / Й. Й. Лучко, Т. В. Гембара // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. – Львів : Каменяр, 2005. – Вип. 6. – С. 506-511.
10. Лучко, Й. Й. Основні системи та технології по захисту бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії і вказівки по їх використанню [Текст] / Й. Й. Лучко, Б. Л. Назаревич, І. І. Глагола // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів : Каменяр, 2000. – Вип. 4. – С. 462-475.
11. Назаревич, Б. Л. Технологія посилення монолітних залізобетонних конструкцій перекриття будівлі (Київ, Чоколівський бульвар, 42а) [Текст] / Б. Л. Назаревич, Й. Й. Лучко, Ю. І. Іваник // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів : Каменяр, 2012. – Вип. 9. – С. 376-385.
12. Jozef J. Luczko. Wzmocnienie monolitycznej konstrukcji zelbetowej budynkow i budowli / Jozef J. Luczko, Bogdan L. Nazarewicz // Praca zbiorowa pod red. M. Kaminskiego "Wspolczesne metody naprawcze w obiektach budowlanych". – Wroclaw : DWE, 2009. – pp. 316–323.
13. Лучко, Й. Й. Деградація залізобетонних будівель та споруд тривалої експлуатації [Текст] / Й. Й. Лучко, І. І. Глагола, Б. Л. Назаревич // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів : Каменяр, 2002. – Вип. 4. – С. 123-131.
14. ДСТУ Б В.2.6-2:2009. Конструкції будинків і споруд. Вироби бетонні і залізобетонні. Загаль-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- ні технічні умови [Текст]. – На заміну ДСТУ Б В.2.6-2-95 ; надано чинності 2010-10-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 28 с.
15. ДБН В.1.2-1-95. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Положення про розслідування причин аварій (обвалень) будівель, споруд їх частин та конструктивних елементів [Текст]. – Надано чинності 1995-07-01. – Київ : Держкоммістобудування України, 1995. – 22 с.
16. Звіт «Технічне обстеження конструктивних елементів цеху виробництва комбікорму за адресою: Київська обл., Переяслав – Хмельницький район, с. Переяславське, вул. Привокзальна 2 видача рекомендацій щодо подальшої безпечної експлуатації» [Текст]. – Львів, 2015. – 60 с.

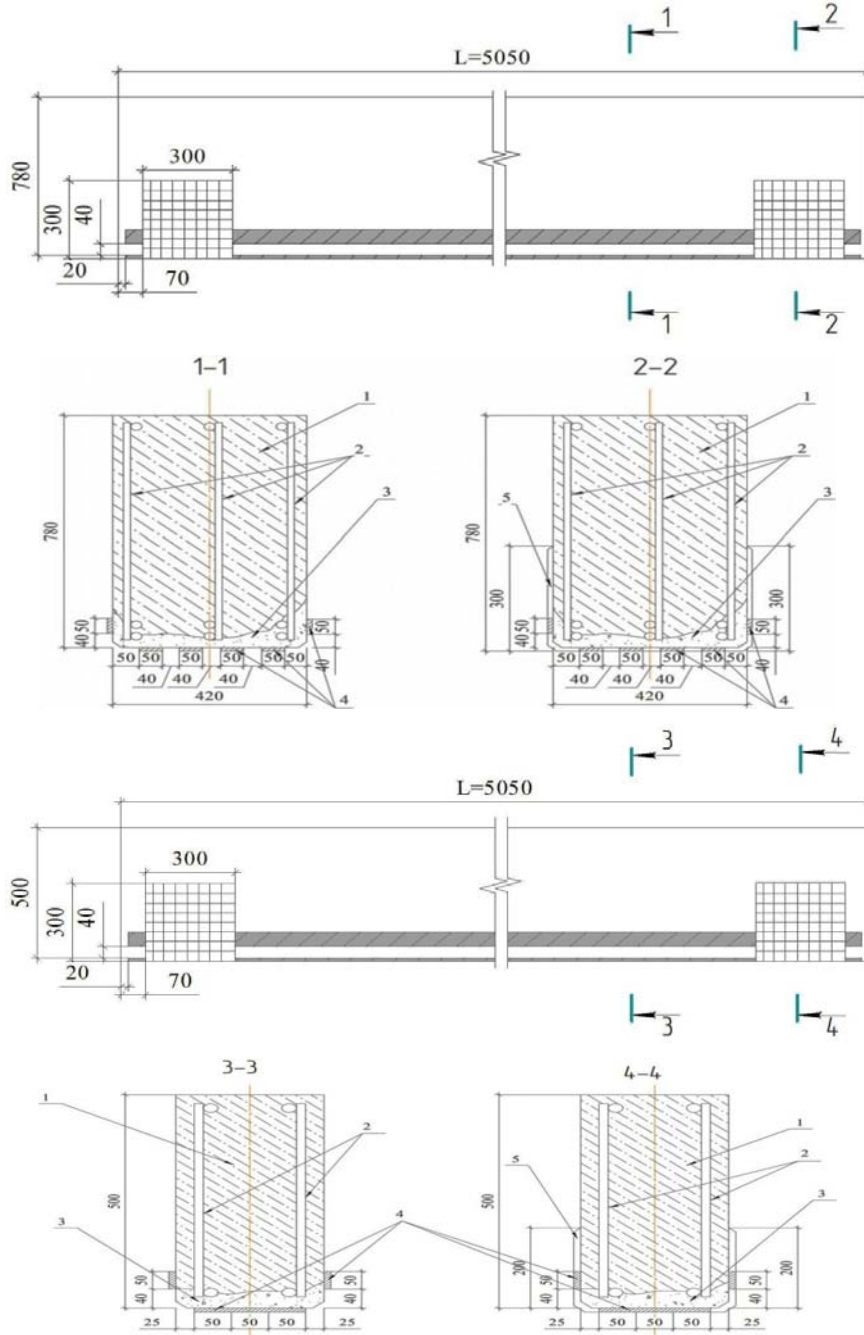


Рис. 3. Конструкція пошкодженої залізобетонної балки:

1 – існуюча залізобетонна балка; 2 – існуючі арматурні каркаси; 3 – відновлена бетонна поверхня за допомогою системи РСС; 4 – композитні стрічки посилення; 5 – вуглецеві мати для анкерування стрічок

* Довжина балок вказана без врахування довжини обтірання.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

И. И. ЛУЧКО¹, Б. Л. НАЗАРЕВИЧ², И. Б. КРАВЕЦ^{3*}

¹ Кафедра «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Иванны Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79052, эл. почта lychko.diit@mail.ru

² Кафедра строительного производства, Институт строительства и инженерии окружающей среды, Национальный университет «Львовская политехника», ул. Карпинского 6, 2-ой корпус, к. 419, Львов, Украина, 79013, эл. почта bnazar@polynet.lviv.ua

^{3*} Кафедра «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Иванны Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79052, эл. почта kravetsivan@mail.ua

ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПОВРЕЖДЕННЫХ КОРРОЗИЕЙ РАЗГРУЗОЧНОГО УЗЛА ПОДЪЕЗДНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Цель. Оценка состояния несущих конструкций здания и разработка решений для дальнейшей ее безопасной эксплуатации **Методика.** Авторами разработаны технологии и материалы, которые дают надежные результаты ремонтно-восстановительных работ до проектных показателей прочности и надежности железобетонных конструкций применяя в том числе инъекционные методы и материалы. В частности, усиление монолитных железобетонных конструкций **Научная новизна.** В ходе исследования установлено, что причиной уменьшения прочности бетона согласно теории железобетона повлекло за собой уменьшение несущей способности железобетонных балок и плит перекрытия. **Практическая значимость.** Для усиления восстановленных балок было предложено применение композитных материалов: ленты и маты из углеродного волокна.

Ключевые слова: несущие конструкции; ремонтно-восстановительные работы; надежность; инъекционные методы; монолитные железобетонные конструкции; ленты; углеродное волокно

Y. Y. LUCHKO¹, B. L. NAZAREVICH², I. B. KRAVETS^{3*}

¹ Dept. of Rolling stock and track, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Lviv branch, 12a I. Blazhkevych St., Lviv, Ukraine, 79052, e-mail lychko.diit@mail.ru

² Dept. of Building Production, Institute of Building and Environmental Engineering, National University «Lviv Polytechnic», 6 Karpinskyi St., 2nd academic building, 419-rs room, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail bnazar@polynet.lviv.ua

^{3*} Dept. of Rolling stock and track, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Lviv branch, 12a I. Blazhkevych St., Lviv, Ukraine, 79052, e-mail kravetsivan@mail.ua

THE RESTORATION OF THE BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS DAMAGED BY CORROSION OF THE HANDLING UNIT OF THE RAILWAY SIDING

Purpose. Assessment of load-bearing structures of the building and development of solutions for its further safe operation. **Methodology.** The authors have developed technology and materials which give the reliable results of the repair work to the design of the strength and reliability of concrete structures including injection techniques and materials. In particular, the strengthening monolithic reinforced concrete structures. **Originality.** During research it was established that the cause of the reduction of concrete strength according to the theory of reinforced concrete resulted in the reduction of the bearing capacity of reinforced concrete beams and slabs. **Practical value.** To enhance the restored beams, the application of composite materials: ribbons and mats of carbon fiber were proposed.

Keywords: structural engineering; repair work; reliability; injection techniques; monolithic reinforced concrete structures; ribbon; carbon fiber

REFERENCES

1. Luchko J. J., Ghlaghola I. I., Nazarevych B. L. *Metody pidvyshhennja korozijnnoi stijkosti ta dovghovichnosti betonnykh ta zalizobetonnykh konstrukcij i sporud* [Methods to improve corrosion resistance and durability of concrete and reinforced concrete structures and buildings]. Ljviv, Kamenjar Publ., 1999. 229 p.
2. Moskvina V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. N., Guzeev Ye. A. *Korozija betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity* [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of protection]. Moscow, Stroizdat Publ., 1980. – 536 s.
3. Luchko J. J., Parneta B. Z., Nazarevych B. L. *Metody zakhystu vid koroziji zalizo-betonnykh konstrukcij i sporud* [Methods for corrosion protection of concrete structures and buildings]. Ljviv, Kamenjar Publ., 2016. 415 p.
4. Marukha V. I., Panasjuk V. V., Sylovanjuk V. P. *In'jekcijsna tekhnologija vidnovlennja robotozdatnosti poskodzenykh sporud tryvaloju ekspluataciji* [Injection technology operability restore damaged buildings long operation]. Ljviv, Spolom Publ., 2009, vol. 12. 262 p.
5. Blikharskij Z. Ja., Ghlaghola I. I., Khmilj R. Je. *Micnistj betonnykh elementiv pid dijeju aghresyvnoho sere dovysshha* [The strength of the concrete elements under the influence of aggressive environment]. *Diagnostyka, dovghovichnistj ta rekonstrukcija mostiv i budivelnjnykh konstrukcij – Diagnosis, durability and reconstruction of bridges and building structures*, Ljviv, Kamenjar Publ., 2002, vol. 4, pp. 30-37.
6. Ghembara T. V., Luchko J. J., Ghlaghola I. I. *Analitichna ocinka korozijnnoi deghradaciji betonu v kyslotnomu sere dovysshi z urakhuvannjam minimaljnoji koncentraciji aghresyvnoji rehovyny* [Analytical evaluation of corrosion degradation of concrete in an acidic environment, taking into account the minimum concentration of aggressive substances]. *Diagnostyka, dovghovichnistj ta rekonstrukcija mostiv i budivelnjnykh konstrukcij – Diagnosis, durability and reconstruction of bridges and building structures*, Ljviv, Kamenjar Publ., vol. 2, pp. 22-27.
7. Luchko J. J., Ghembara T. V. *Metody vyznachennja navantazhennja trishhynoutvorennja dlja ocinky korozijnnoi tryvkosti zalizobetonnykh konstrukcij* [Methods for determination of fracture load for evaluating the corrosion resistance of reinforced concrete structures]. *Diagnostyka, dovghovichnistj ta rekonstrukcija mostiv i budivelnjnykh konstrukcij – Diagnosis, durability and reconstruction of bridges and building structures*, Ljviv, Kamenjar Publ., 2004. – Vyp. 6. – S. 59-64.
8. Luchko J. J., Ghembara T. V. *Rozvytok zapovnennoi ljodom krajovoju trishhyny v betoni pry dovghotryvalykh zghynalnykh navantazhennjakh* [Development ice-filled cracks in concrete boundary at long bending loads]. *Diagnostyka, dovghovichnistj ta rekonstrukcija mostiv i budivelnjnykh konstrukcij – Diagnosis, durability and reconstruction of bridges and building structures*, Ljviv, Kamenjar Publ., 2003, vol. 5, pp. 123-127.
9. Luchko J. J., Ghembara T. V. *Problemy ocinky vplyvu fizychnykh faktoriv na koroziju betonnykh ta zalizobetonnykh elementiv konstrukcij* [The problems of assessing the impact of physical factors on corrosion of concrete and reinforced concrete structural elements]. *Mekhanika i fizyka rujnuvannja budivelnjnykh materialiv i konstrukcij – Fracture mechanics and physics of building materials and structures*, Ljviv, Kamenjar Publ., 2005, vol. 6, pp. 506-511.
10. Luchko J. J., Nazarevych B. L., Ghlaghola I. I. *Osnovni systemy ta tekhnologiji po zakhystu betonnykh i zalizobetonnykh konstrukcij vid koroziji i vkazivky po jikh vykorystannju* [Key systems and technologies for the protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion and instructions on their use]. *Mekhanika i fizyka rujnuvannja budivelnjnykh materialiv i konstrukcij – Fracture mechanics and physics of building materials and structures*, Ljviv, Kamenjar Publ., 2000, vol. 4, pp. 462-475.
11. Nazarevych B. L., Luchko J. J., Ivanyk Ju. I. *Tekhnologija posylennja monolitnykh zalizobetonnykh konstrukcij perekryttja budivli* (Kyiv, Chokolivskyj bulvar, 42a) [The technology of monolithic concrete structures strengthening floor building (Kyiv, Chokolovsky Boulevard, 42a)]. *Mekhanika i fizyka rujnuvannja budivelnjnykh materialiv i konstrukcij – Fracture mechanics and physics of building materials and structures*, Ljviv, Kamenjar Publ., 2012, vol. 9, pp. 376-385.
12. Jozef J. Luczko, Bogdan L. Nazarewicz *Wzmocnienie monolitycznej konstrukcji zelbetowej budynkow i budowli*. Praca zbiorowa pod red. M. Kaminskiego “Wspolczesne metody naprawcze w obiektach budowlanych”. Wroclaw, DWE, 2009, pp. 316 – 323.
13. Luchko J. J., Ghlaghola I. I., Nazarevych B. L. *Deghradacija zalizobetonnykh budivelj ta sporud tryvaloju ekspluataciji* [Degradation of reinforced concrete buildings long operation]. *Diagnostyka, dovghovichnistj ta rekonstrukcija mostiv i budivelnjnykh konstrukcij – Diagnosis, durability and reconstruction of bridges and building structures*, Ljviv, Kamenjar Publ., 2002, vol. 4, pp. 123-131.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

14. DSTU B V.2.6-2:2009. Konstrukciji budynkiv i sporud. Vyroby betonni i zalizobetonni. Zaghaljni tekhnichni umovy [State Standard B V.2.6-2:2009. Construction of buildings and structures. Concrete and concrete. General specifications]. Kyjiv, Minreghionbud Ukrainy Publ., 2010. 28 p.
15. DBN V.1.2-1-95. Systema zabezpechennja nadijnosti ta bezpeky budivel'nykh ob'ektiv. Polozhennja pro rozsliduvannja prychn avarij (obvalenj) budivel', sporud jikh chastyn ta konstruktyvnykh elementiv [State Standard V.1.2-1-95. System reliability and safety of construction projects. Regulation on the investigation into the causes of accidents (collapse) of buildings, structures and their parts and structural elements]. Kyjiv, Minreghionbud Ukrainy Publ., 1995. 22 p.
16. Zvit «Tekhnichne obstezhennja konstruktyvnykh elementiv cekhu vyrobnyctva kombikormu za adresoju: Kyjivska obl., Perejaslav – Khmel'nyckyj rajon, s. Perejaslavske, vul. Pryvokzalna 2 vydacha rekomendacij shhodo podaljšhoji bezpechnoji ekspluataciji» [The report "Technical examination of structural elements of the workshop production of feed for al-RESO: Str., Pereyaslav – Chmel'nica-cue area with. Pereyaslavskoe Str. Railroad station 2 issuing recommendations on further bezpech-term operation]. Ljviv, 2015, 60 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н, проф. С. Й. Солоджим (Україна), д.т.н., доц. О. Л. Тютюкіним (Україна).

Надійшла до редколегії 29.11.2016.

Прийнята до друку 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.012.45/.042.62-047.58

К. В. МЕДВЕДЕВ^{1*}, В. А. ТЕМИРГАЛИЕВ²

^{1*} Кафедра мостов и тоннелей, Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, эл. почта general@ntu.edu.ua

² Кафедра мостов и тоннелей, Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, эл. почта general@ntu.edu.ua

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОСТОВ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА

Цель. Провести анализ реального напряженно деформированного состояния предварительно напряженных конструкций с учетом ползучести бетона и потерь предварительного напряжения в арматуре на различных этапах строительства и в период эксплуатации конструкции. **Методика.** Используются современные численные методы и натурные испытания. **Результаты.** Сформулирована математическая постановка МКЭ с учетом предварительно напряженного армирования и ползучести бетона. Даны рекомендации по выбору моделей. Выполнен сравнительный анализ с экспериментальными данными по учету потерь. **Научная новизна.** Описаны современные особенности построения КЭ моделей предварительно напряженных мостов и приведены зависимости для учета в этой модели предварительно напряженного армирования и длительных процессов в бетоне. Выполнено сравнение потерь предварительного натяжения полученных в результате расчетов по нормативным документам и данных экспериментального мониторинга существующих конструкций. **Практическая значимость.** Точный учет длительных деформаций в предварительно напряженных конструкциях дает возможность, в ряде случаев, избежать в конструкциях мест с перенапряжением и, как следствие, возникновения продольных трещин или мест с недостаточным предварительным напряжением в которых возникают поперечные трещины на стадии эксплуатации.

Ключевые слова: НДС; ползучесть бетона; потери предварительного натяжения

Введение

Современное мостостроение в Украине идет по пути все большего применения железобетонных конструкций. При этом в городских условиях, из-за плотной застройки, в большей степени стали преобладать монолитные предварительно напряженные конструкции пролетных строений. На напряженно деформированное состояние таких конструкций оказывает влияние, как способ возведения конструкции, так и длительные процессы в бетоне. Поэтому, для полноты учета силовых факторов, возникающих в монолитных конструкциях, требуется более точные способы учета ползучести и усадки [1, 2], нормативные зависимости для определения, которых, не изменились с 60-х годов прошлого столетия [5]. С применением метода конечных элементов (далее МКЭ), расчет данных конструкций значительно упростился, однако до сих пор до конца не раскры-

ты вопросы наиболее удачного моделирования монолитных конструкций, постановка учета ползучести и введения предварительного натяжения в МКЭ, учета потерь на основе современных методик, влияния арматурного запира-ния на потери в арматурных элементах и т.д. Данная статья ставит своей целью частично осветить данные вопросы.

Основная часть

Расчет предварительно напряженных конструкций, возводимых методами бетонирования на сплошных подмостях, а также навесного монтажа (рис. 1) требуют специальных расчетов, как конструкции в целом, так и промежуточных конструктивных форм, которые образуются в процессе возведения [3]. В процессе создания конструкции постоянно изменяется не только геометрия сооружения, но и свойства бетона, которые зависят от времени: модуль

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

упругости и прочность на сжатие. Напряженно-деформированное состояние (далее НДС) конструкции продолжают изменяться не только в процессе монтажа, но и после его завершения из-за изменения зависящих от времени свойств бетона таких, как ползучесть, усадка, модуль упругости (старение), а также вследствие релаксации предварительно напряженной арматуры. Таким образом, каждое промежуточное состояние возведения конструкции влияет на последующие стадии возведения. В этом случае, одним из наиболее важных становится вопрос выбора модели, ее построения и учета вышеописанных свойств.

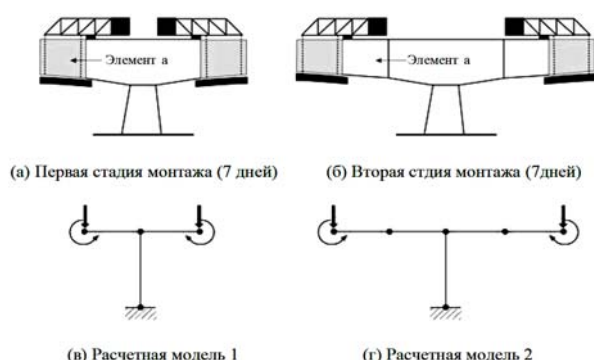


Рис. 1. Расчетные схемы навесного монтажа

Среди моделей, применяющихся для расчета предварительно напряженных мостов, чаще других используются стержневые и объемные конечно-элементные (далее КЭ) модели [4, 5]. Их особенности по представлению предварительно напряженного напряжения, учета длительных процессов и при анализе результатов описаны ниже.

Представление предварительного натяжения в КЭ постановке

1. Стержневые модели

Стержневые модели наиболее часто используются для аппроксимации пролётных строений, опор и фундаментов мостовых конструкций. Их преимуществом является понятные для всех проектировщиков результаты, выражаемые в компонентах усилий в стержневых конструкциях. Как известно, они довольно точно отображают реальную работу конструкций балочных, арочных, ферменных конструкций мостов и нашли свое применение во всех программных комплексах, реализующих МКЭ. Большую часть предварительно напряженных конструкций, в том числе монолитных, так же можно

описать пространственным стрержнем. Трудности могут возникнуть лишь при учете предварительного напряжения в таких конструкциях. Для стержневых моделей суть задания предварительного напряжения состоит в замене данного влияния эквивалентной нагрузкой, как показано на рис. 2.

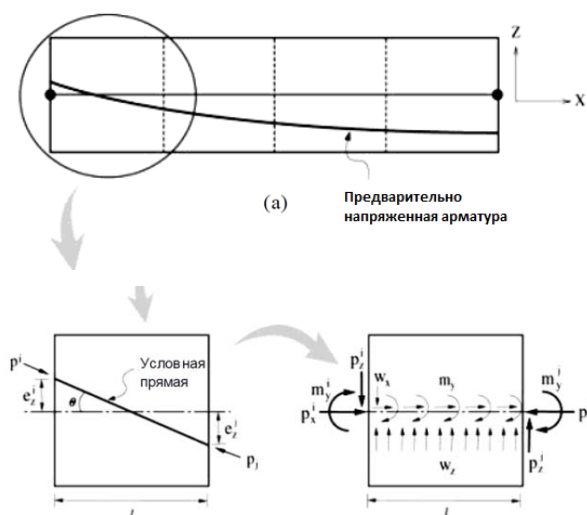


Рис. 2. Схема введения предварительного натяжения

При этом процесс замены эквивалентными нагрузками аналогичен для плоскостей X-Y и X-Z. Нагрузки прикладываются одновременно в узлах и по длине стержня. При этом участок профиля предварительно напряженной арматуры вдоль элемента считается линейным. Силы натяжения арматуры p^i и p^j не равны из-за наличия потерь. Три сосредоточенные обобщенные силы (p_x , m_y , p_z) на каждом конце элемента i и j , сами по себе не обеспечивают равновесия, и поэтому вводятся распределенные нагрузки. Для вычисления сосредоточенных нагрузок на каждом конце элемента используются уравнения (1) и (2), а для вычисления внутренних распределенных нагрузок используются уравнения (3) и (4).

$$p_x^i = p^i \cdot \cos \theta; p_z^i = p^i \cdot \sin \theta; m_y^i = p_x^i \cdot e_z^i \quad (1)$$

$$p_x^j = p^j \cdot \cos \theta; p_z^j = p^j \cdot \sin \theta; m_y^j = p_x^j \cdot e_z^j \quad (2)$$

$$\sum F_x = p_x^i + w_x \cdot l - p_x^j = 0; w_x = \frac{p_x^j - p_x^i}{l};$$

$$\sum F_z = -p_z^i + w_z \cdot l - p_z^j = 0; w_z = \frac{p_z^j - p_z^i}{l}. \quad (3)$$

$$\sum M_y^j = m_x^i - p_z^i \cdot l + w_z \frac{l^2}{2} + m_x^j + m_y^j = 0;$$

$$m_y = p_z^i - w_z \frac{l}{2} - \frac{m_x^i + m_y^j}{l}. \quad (4)$$

Современные программные комплексы, реализующие МКЭ, вычисляют зависящее от времени снижение предварительного напряжения, возникающее вследствие ползучести, усадки бетона и релаксации арматурных элементов, на каждой стадии монтажа, а также снижение предварительного напряжения, обусловленное воздействием внешних нагрузок, температуры и т.д. Вначале, на каждой стадии монтажа рассчитывается изменение сил натяжения арматуры и приращение силы натяжения конвертируется в эквивалентные нагрузки, которые прикладываются к элементу, как было показано выше.

2. Объёмные модели

В практике проектирования довольно часто встречаются мостовые конструкции, характеристики геометрии которых, невозможно аппроксимировать стержневым КЭ и получить приемлемый результат. Связано это с отношением пролёта и ширины массивной конструкции, различными разветвлениями эстакад, конструкциями, нагружаемыми в нескольких направлениях и т.д. В этом случае чаще всего применяют аппроксимацию пролётных строений объёмными КЭ, имеющих большое число разновидностей.

Предварительно напряжённое армирование в объёмных конечных элементах тесно связано с понятием «материнский» элемент, с которым взаимодействует арматура. Арматура может быть представлена линией или узлом, в зависимости от типа материнского элемента.

В процессе определения арматуры в модели, профиль арматурного стержня автоматически разделяется на сегменты, соответствующие элементам встраиваемой арматуры. При этом жесткость разделённых сегментов арматуры добавляется к жесткости соответствующих «материнских» элементов. В сегментах армирующих элементов, 2 узла интегрирования используются для линии. На рис. 3, а показаны два сегмента армирования с точками определения их местоположения и точками интеграции. Рис. 3, б показывает компоненту напряжения σ_{xx} и деформации ϵ_{xx} в точках интеграции. Напряжения сегмента арматуры ориентированы на месте расположения точки интеграции по касательной.

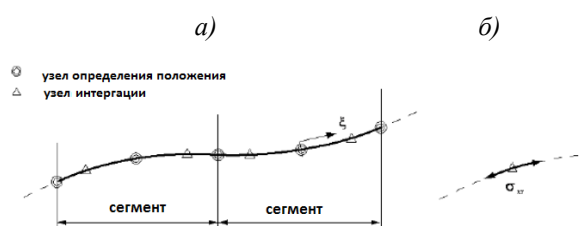


Рис. 3. Армирующий элемент

Во всех объёмных элементах арматурный элемент может быть определен с помощью 2-х или 3-х узловых отрезков. Арматура может состоять из одной или нескольких секций армирования. Каждая секция разделена на один или несколько сегментов армирования, которые расположены в одном «материнском» элементе. Рис. 4 показывает армирующий элемент, состоящий из двух сегментов.

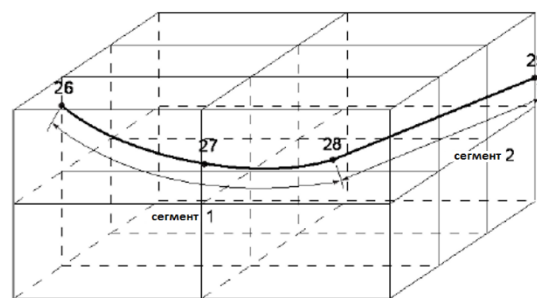


Рис. 4. Армирующий элемент в объёмных элементах

Первая секция определяется узлами армирования 26, 27 и 28, а вторая узлами 28 и 29. Первая секция определена более высоким порядком, в то время как вторая секция более низким.

В математической постановке МКЭ сегмент армирования состоит из узлов определения местоположения, и каждый узел определяется точками с координатами X_{re}^i , Y_{re}^i и Z_{re}^i . Узлы могут быть выражены в виде матрицы

$$X_{re} = \begin{Bmatrix} X_{re}^1 & X_{re}^2 & \dots & X_{re}^3 \\ Y_{re}^1 & Y_{re}^2 & \dots & Y_{re}^3 \\ Z_{re}^1 & Z_{re}^2 & \dots & Z_{re}^3 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Функция формы армирования может быть выражена как

$$N = \{N_1 \quad N_1 \quad \dots \quad N_n\}. \quad (6)$$

Общий вид функции формы $N_i (i=1, 2, \dots, n)$ зависит от порядка сегмента арматуры и определяется следующим образом:

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- функция формы для линейного двухузлового арматурного элемента:

$$N_1(\xi) = \frac{1}{2}(1 - \xi), N_2(\xi) = \frac{1}{2}(1 + \xi); \quad (7)$$

- функция формы для трехузлового арматурного элемента

$$N_1(\xi) = -\frac{1}{2}(1 - \xi)\xi, \quad N_2(\xi) = \frac{1}{2}(1 + \xi)\xi, \\ N_3(\xi) = \frac{1}{2}(1 - \xi^2). \quad (8)$$

Для каждой точки интеграции на отрезке армирования, вычисляются изопараметрические координаты по отношению к «материнскому» элементу.

Изопараметрические координаты J-го узла интегрирования сегмента арматуры в 3D-элементе можно записать в виде

$$G_j(\xi, \eta, \zeta). \quad (9)$$

Изопараметрические координаты J-го узла интегрирования отрезка армирующей в 2D элементе можно записать в виде

$$G_j(\xi, \eta). \quad (10)$$

$\hat{B}_{Rein}$ в уравнении (11) представляет собой матрицу деформации для арматурного элемента в точке интеграции J-й секции армирования в зависимости от перемещений узлов материнского элемента.

$$\hat{B}_{Rein}^j = B_{mother}(G_j). \quad (11)$$

Матрица деформаций арматурного элемента использует систему координат «материнского» элемента. Если «материнским» элементом является 3D-элемент, то деформации в локальной системе координат могут быть трансформированы в деформации в локальной системе координат арматурного элемента следующим образом

$$T \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \vdots \\ \varepsilon_{zz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{\bar{x}\bar{x}} \\ \varepsilon_{\bar{y}\bar{y}} \end{Bmatrix}. \quad (12)$$

Здесь T представляет собой матрицу, которая проектирует и поворачивает тензор дефор-

мации «материнского» элемента в тензор деформации сегмента армирования. То же самое преобразование может быть применено к матрице B .

$$\hat{B}_{Rein}^j = T \hat{B}_{Rein}^j. \quad (13)$$

Матрица напряжение-деформация в арматуре, представленной стержнем, может быть выражена следующим образом

$$D = E_{\bar{x}\bar{x}} A_e, \quad (14)$$

где A представляет собой поперечное сечение арматуры.

Напряжения в локальной системе координат арматуры могут быть получены следующим образом

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \end{Bmatrix} = D \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \end{Bmatrix}. \quad (15)$$

Вклад сегмента армирования к матрице жесткости элемента

$$\int_V B_{Rein}^T \cdot D \cdot B_{Rein} \cdot dV = K_{Rein} \quad (16)$$

и вклад сегмента армирования к вектору внутренних усилий элемента

$$\int_V B_{Rein}^T \cdot \sigma \cdot dV = F_{Rein}, \quad (17)$$

где σ тензор напряжений в точке интеграции арматуры, как определено в (15).

После численного интегрирования уравнений (16) и (17), вклад армирующего сегмента в жесткость «материнского элемента» и вектора внутренних усилий может быть выражен следующим образом

$$\sum_{j=1}^{N_{ip}} B_{Rein}^j{}^T \cdot D \cdot B_{Rein}^j \det J^j; \\ \sum_{j=1}^{N_{ip}} B_{Rein}^j{}^T \cdot \sigma \det J^j \quad (18)$$

где N_{ip} представляет собой число точек интеграции в сегменте армирования.

Объемное КЭ моделирование дает возможность учесть, не только детально проработанные сложные конфигурации геометрии, но и поэтапное возведение с постнатяжением. Примеры таких проектов показаны на рис. 5.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

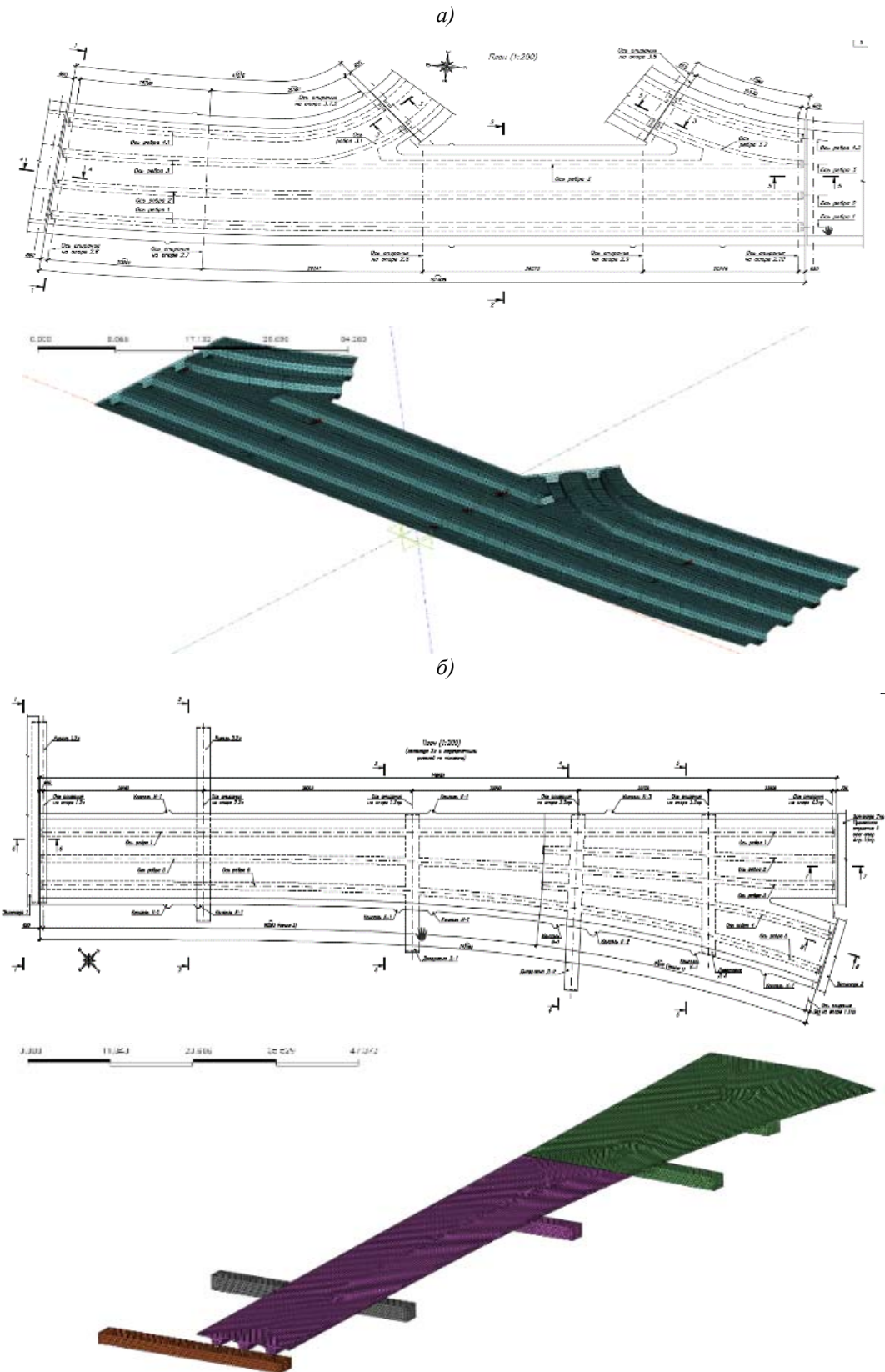


Рис. 5. План и расчетная схема конструкции пролетных строений:
 а) – г. Москва. Эстакада на ул. Боженко-Толбухина; б) – г. Москва. Эстакада на участке от шоссе Энтузиастов до МКАД

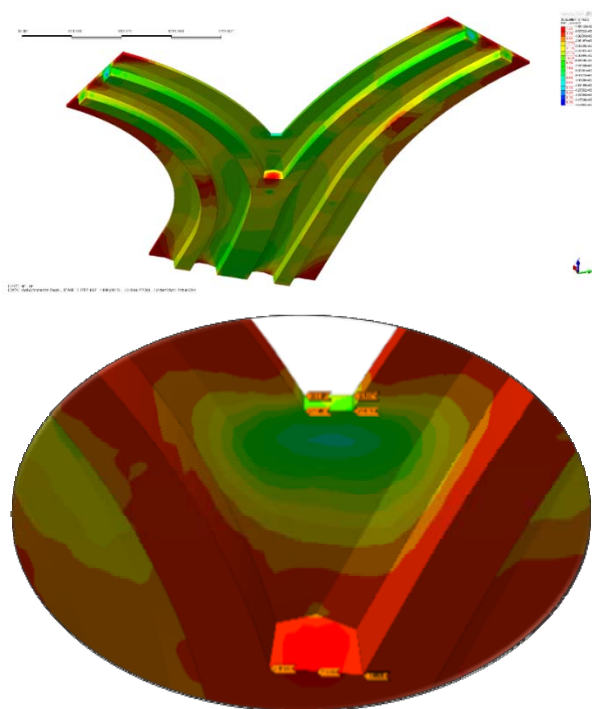


Рис. 6. Результаты главных напряжений в узле разветвления пролетного строения на стадии эксплуатации, МПа

Расчеты с учетом изменения свойств конструкции во времени

Ползучесть проявляется не только в росте деформаций пре/пост напряженных мостов, но также влияет и на предварительное напряжение арматурных элементов, изменяя тем самым поведение конструкции.

Одним из основных методов, используемых в практике МКЭ для расчета ползучести в бетонных конструкциях, является метод, в котором для каждого элемента, на каждом этапе, непосредственно вводится коэффициент ползучести и учитывается напряжение, возникшее в элементе к текущему моменту времени (рис. 7).

Другой часто используемый метод основан на том, что функции ползучести выражаются численно и интегрируются по напряжениям и по времени. Первый метод требует задания коэффициентов ползучести для каждого элемента на каждой стадии. Второй метод рассчитывает

ползучесть путем интегрирования напряжений, зависящих от времени, используя коэффициенты ползучести, имеющиеся во встроенных стандартах.



Рис. 7. Зависящие от времени деформации бетона

Общая деформация ползучести от момента времени t_0 до текущего момента t может быть выражена в виде интеграла от ползучести, обусловленной напряжением, возникающим на каждом этапе.

$$\varepsilon_c(t) = \int_{t_0}^t C(t, t-t_0) \frac{\partial \sigma(t_0)}{\partial t_0} dt_0, \quad (19)$$

где $\varepsilon_c(t)$ – деформация ползучести в текущий момент, $C(t, t-t_0)$ – удельная ползучесть, t_0 – время приложения нагрузки.

Если в приведенном выше выражении предположить, что напряжение на протяжении каждого этапа постоянно, то полная деформация ползучести может быть упрощенно представлена как сумма деформаций на каждом этапе

$$\varepsilon_{c,n} = \sum_{j=1}^{n-1} \Delta \sigma_j C(t_j, t_{n-j}). \quad (20)$$

С использованием упрощенной формулы для полной деформации ползучести приращение деформации ползучести $\Delta \varepsilon_{c,n}$ между этапами t_n и t_{n-1} можно записать в следующем виде

$$\Delta \varepsilon_{c,n} = \varepsilon_{c,n} - \varepsilon_{c,n-1} = \sum_{j=1}^{n-1} \Delta \sigma_j C(t_j, t_{n-j}) - \sum_{j=1}^{n-2} \Delta \sigma_j C(t_j, t_{n-j}). \quad (21)$$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Если удельная ползучесть представлена как вырожденное ядро (сумма ряда), приращение деформации ползучести можно вычислить, не имея в наличии историю изменения напряжения во времени.

$$C(t_0, t - t_0) = \sum_{i=1}^m a_i(\tau) \left[1 - e^{-(t-t_0)/\Gamma_i} \right], \quad (22)$$

$$\Delta \varepsilon_{c,n} = \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^{n-2} \Delta \sigma_j a_i(t_j) e^{-(t-t_0)/\Gamma_i} + \sigma_{n-1} a_i(t_{n-1}) \right] \times \left[1 - e^{-(t-t_0)/\Gamma_i} \right];$$

$$\Delta \varepsilon_{c,n} = \sum_{i=1}^m A_{i,n} \left[1 - e^{-(t-t_0)/\Gamma_i} \right]; A_{i,n} = \sum_{j=1}^{n-2} \Delta \sigma_j a_i(t_j) e^{-(t-t_0)/\Gamma_i} + \Delta \sigma_{n-1} a_i(t_{n-1}). \quad (23)$$

Из уравнения для $A_{i,n}$ $A_{i,n-1}$ получим

$$A_{i,n-1} = \sum_{j=1}^{n-3} \Delta \sigma_j a_i(t_j) e^{-(t-\tau_j)/\Gamma_i} + \Delta \sigma_{n-2} a_i(t_{n-2}). \quad (24)$$

Таким образом, соотношение между $A_{i,n}$ и $A_{i,n-1}$

$$A_{i,n} = A_{i,n-1} e^{-(t-\tau_{n-1})/\Gamma_i} + \Delta \sigma_{n-1} a_i(\tau_{n-1}),$$

$$A_{i,1} = \Delta \sigma_0 a_i(\tau_0). \quad (25)$$

С помощью изложенного метода приращение деформации для каждого элемента на каждом этапе может быть получено, исходя из напряжения, возникшего на непосредственно предшествующем этапе, и модифицированного напряжения всех предыдущих этапов. Этот метод обеспечивает сравнительно точный расчет, отражающий изменения в напряжениях.

Результаты мониторинга предварительно напряженных конструкций мостов

Вышеописанные способы учета длительных процессов используя численные методы, а также разработанные инженерные методики по учету потерь в пост напрягаемых конструкциях дают возможность оценить реальное изменение напряженно-деформированного состояния (далее НДС) в процессе возведения конструкции, а также изменения напряжения в арматуре. Данное изменение часто называют потерями предварительного натяжения, которое, есть необходимость сравнить с реальными конструкциями

где $a_i(\tau)$ - коэффициенты, относящиеся к первоначальному виду кривых удельной ползучести в момент приложения нагрузки τ ; Γ_i - значения, относящиеся к виду кривых удельной ползучести на протяжении периода времени.

Используя приведенное выше выражение для удельной ползучести, приращение деформации можно записать следующим образом

эксплуатирующийся мостов. В качестве объектов натурального сравнения были выбраны конструкции с системами мониторинга НДС (рис. 8).

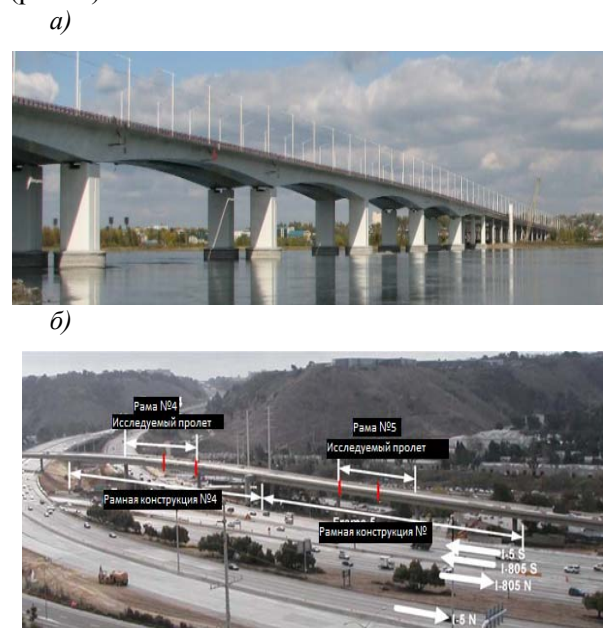


Рис. 8. Примеры мостов:

- а) – русловая часть моста через р. Ангару в Иркутске;
б) – моста на шоссе Interstate I5-805 в Сан-Диего и I215-CA91 в Риверсайд, штат Калифорния

Первая предварительно напряженная конструкция была возведена методом навесного монтажа в г. Иркутске в 2008 г. Имеет систему автоматизированного мониторинга с системой тензодатчиков, измеряющих деформации пролетного строения одного из русловых пролетов.

Второй мост расположен в штате Калифорния на шоссе Interstate I5-805 и имеет несколько рамных конструкций, которые находятся в

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

процессе мониторинга деформаций. Конструкция моста возведена методом по-пролетного бетонирования на сплошных подмостях и за-проектирована с учетом норм [7].

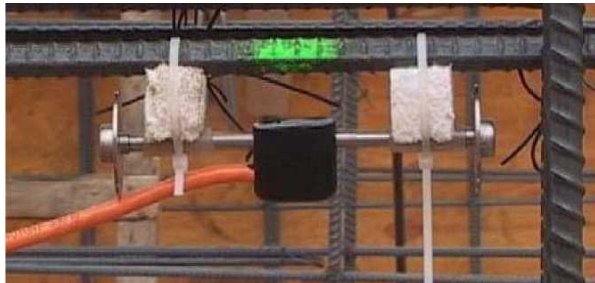


Рис. 9. Вид сверху размещения тензорезистора до бетонирования в конструкции моста (Льюис, штат Калифорния)

Потери, вызванные длительными деформациями бетона, вычислялись на основе зависимости (26) с учетом уменьшения напряжений в арматуре вызванных трением и деформацией и обпрессовкой анкером.

$$\Delta\sigma_{ps} = \Delta\epsilon_c E_p + \Delta\sigma_{pr}, \quad (26)$$

$\Delta\epsilon_c$ – изменение напряжения бетона на уровне арматуры во времени; E_p – модуль упругости напрягаемой арматуры; $\Delta\sigma_{pr}$ – снижение напряжения, вызванное релаксацией.

Для сравнения с результатами эксперимента принимались зависимости из приложения Т нормативного документа [5]. Вторые потери от действия ползучести вычислялись с учетом первых на основе формул 27.

$$\left(\begin{array}{l} \frac{40\sigma_{bp}}{R_{bp}} \text{ при } \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} \leq 0,8 \\ 32 + 94 \left(\frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} - 0,8 \right) \text{ при } \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} > 0,8 \end{array} \right) \quad (27)$$

Как видно из графиков (рис. 10), нормативные зависимости, описанные в [5, 10], учитывающие потери в предварительно напряженных элементах от действия ползучести и усадки бетона, существенно отличаются от результатов мониторинга существующих сооружений. При этом следует заметить, что нормативные формулы для учета потерь дают результаты в запас или с недостатком по сравнению мониторингом в зависимости от метода сооружения и других условий.

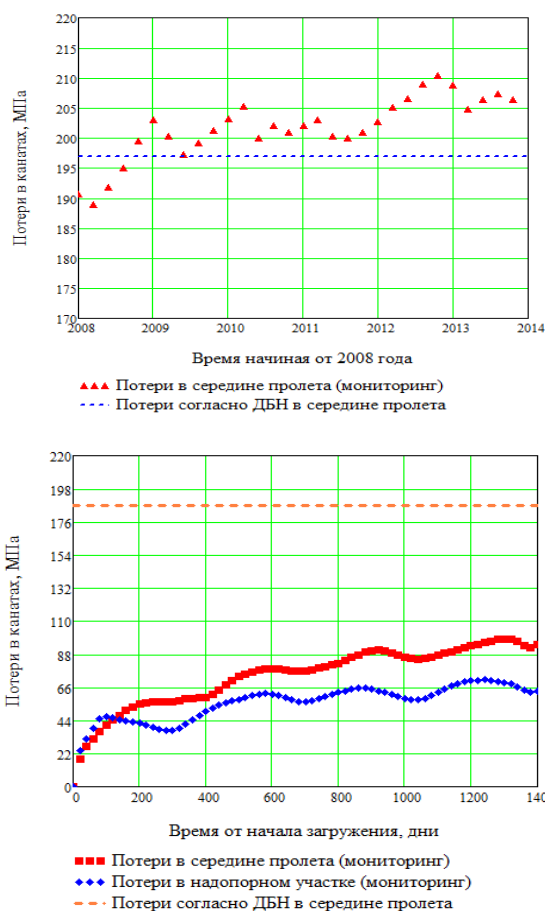


Рис. 10. График изменения полных потерь на основе мониторинга

Выводы

Как видно из исследований большое значение имеет необходимость не только применить расчетный комплекс, но и выбрать соответствующую КЭ модель. При этом в моделировании предварительно напряженных конструкций большое внимание следует уделять постановке введения предварительного натяжения арматуры, созданию стадий возведения, а также учету длительных процессов в бетоне. Вышеописанные вопросы являются громоздкими и возможность допустить ошибку значительно возрастает. Вместе с тем, нормативные методики дают результаты, отдаленные от НДС существующих сооружений, из чего следует необходимость разработки современной инженерной методики по учету влияния длительных процессов в бетоне на потери предварительного натяжения с учетом стадий возведения конструкции.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ

1. Гишман, Е. Е. Теория и расчет предварительно-напряженных железобетонных мостов [Текст] / Е. Е. Гишман, М. Е. Гишман. – Москва : Автотрансиздат, 1963. – 397 с.
2. Гишман, М. Е. Теория расчета мостов сложных пространственных систем [Текст] / М. Е. Гишман. – Москва : Транспорт, 1973. – 200 с.
3. Быкова, Н. М. Моделирование и расчёт мостов на статические и динамические нагрузки и воздействия [Текст] / Н. М. Быкова, Т. М. Баранов, В. А. Темиргалиев. – Иркутск : ИрГУПС, 2016. – 240 с.
4. Лившиц, Я. Д. Расчет железобетонных конструкций с учетом влияния усадки и ползучести бетона [Текст] / Я. Д. Лившиц. – Київ : Вища школа, 1976. – 279 с.
5. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – Надано чинності 2007-02-01. – Київ : Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
6. Eurocode no. 2 EN 1992-1-1: 2004. Design of concrete structures [General Rules and Rules for Building]. Brussels, 2004. 225 p.
7. AASHTO-LRFD Bridge Design Specifications [American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)]. Washington, DC, 2004.
8. Ghali A., Elbadry M. M. Serviceability Design of Continuous Prestressed Concrete Structures. *PCI Journal*, 1989, vol. 34, no. 11, pp. 54-91.
9. Kahn L. F., Lopez M. Prestress losses in high performance lightweight concrete pretensioned bridge girders. *PCI Journal*, 2005, vol. 50, no. 5, pp. 84-94.
10. CEB-FIP MC 90 Model Code for Concrete Structures [Comite Euro-International du Beton - Federation Internationale de la Precontrainte (CEB-FIP)]. London, UK, 1993.

К. В. МЕДВЕДЕВ^{1*}, В. А. ТЕМИРГАЛІЄВ²^{1*} Кафедра мостів і тунелів, Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м Київ, Україна, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, ел. пошта general@ntu.edu.ua² Кафедра мостів і тунелів, Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м Київ, Україна, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, ел. пошта general@ntu.edu.uaОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПОПЕРЕДНЬОГО
НАПРУЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ МОСТІВ З УРАХУВАННЯМ
ПОВЗУЧОСТІ БЕТОНУ

Мета. Провести аналіз реального напружено деформованого стану попередньо напружених конструкцій з урахуванням повзучості бетону і втрат попереднього напруження в арматурі на різних етапах будівництва та в період експлуатації конструкції. **Методика.** Використано сучасні чисельні методи і натурні випробування. **Результати.** Сформульована математична постановка МСЕ з урахуванням попередньо напруженого армування і повзучості бетону. Дано рекомендації по вибору моделей. Виконано порівняльний аналіз з експериментальними даними по врахуванню втрат. **Наукова новизна.** Описано сучасні особливості побудови МСЕ моделей попередньо напружених мостів і наведені залежності для врахування в цих моделях попередньо напруженого армування і тривалих процесів в бетоні. Виконано порівняння втрат попереднього напруження отриманих в результаті розрахунків за нормативними документами та даних експериментального моніторингу існуючих конструкцій. **Практична значимість.** Точне врахування тривалих деформацій в попередньо напружених конструкціях дає можливість в ряді випадків уникнути в конструкціях місць з перенапруженням і як наслідок - виникнення поздовжніх тріщин або місць з недостатнім попереднім напруженням, в яких виникають поперечні тріщини на стадії експлуатації.

Ключові слова: МСЕ; повзучість бетону; втрати попереднього напруження

К. V. MEDVEDEV^{1*}, V. A. TEMIRGALIEV²^{1*} Department of bridges and tunnels, National Transport University, 1 Suvorov st., Kiev, Ukraine, 01010, tel. +38 (044) 280 82 03, e-mail general@ntu.edu.ua² Department of bridges and tunnels, National Transport University, 1 Suvorov st., Kiev, Ukraine, 01010, tel. +38 (044) 280 82 03, e-mail general@ntu.edu.ua

FEATURES MODELING OF PRESTRESSED STRUCTURES BRIDGES WITH REGARD TO CREEP OF CONCRETE

Purpose. To analyze real stress strain state of prestressed concrete structures subject to creep and prestressed losses in the reinforcement in various stages of construction and operation. **Methodology.** The use of modern numerical methods and structural test. **Findings.** The paper describes the mathematical relationships for FEM for prestressed reinforcement concrete with creep. Recommendations were made on the choice of models. A comparative analysis was performed with experimental data on losses accounting. **Originality.** Modern design features for FE models of prestressed bridges and presented according to account in this model of prestressed reinforcement and long-term processes in the concrete has been described. Prestressing losses resulted from calculations on regulatory documents and experimental monitoring of existing data structures were compared. **Practical value.** Accurate accounting of long-term deformation in prestressed structures makes it possible in some cases to avoid in the construction places with overstress and as a consequence - occurrence of longitudinal cracks. In addition, correct account of prestressing losses to avoid transverse cracks in the bridge spans in the operational phase.

Keywords: FEM; creep of concrete; loss of prestressed concrete

REFERENCES

1. Gibshman E. E., Gibshman M. E. *Teoriya i raschet predvaritelno napryazhennykh zhelezobetonnykh mostov* [Theory and Design of prestressed concrete bridges]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1963. 397 p.
2. Gibshman M. E. *Teoriya rascheta mostov slozhnykh prostranstvennykh system* [Theory bridge design complex spatial systems]. Moscow, Transport Publ., 1973. 200 p.
3. Bykova N. M., Baranov T. M., Temirgaliiev V. A. *Modelirovanie i raschet mostov na staticheskie i dinamicheskie nagruzki i vozdeystviya* [Simulation and calculation of bridges static and dynamic loads and impact]. Irkutsk, Il-GUPS Publ., 2016. 240 p.
4. Livshits Y. D. *Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy s uchetom vliyaniya usadki i polzuchesti betona* [Calculation of reinforced concrete structures, taking into account the influence of shrinkage and creep of concrete]. Kiev, Vishcha Shkola Publ., 1976. 279 p.
5. *DBN V.2.3-14-2006. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannya* [State Standard V.2.3-14-2006. Transport constructions. Bridges and pipes. Design rule]. Kyiv, Ministerstvo budivnytstva, arkhitektury i zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Publ., 2006. 359 p.
6. Eurocode no. 2 EN 1992-1-1: 2004. *Desing of concrete structures* [General Rules and Rules for Building]. Brussels, 2004. 225 p.
7. *AASHTO-LRFD Bridge Design Specifications* [American Association of State Highway and Transportations Officials (AASHTO)]. Washington, DC, 2004.
8. Ghali A., Elbadry M. M. Serviceability Design of Continuous Prestressed Concrete Structures. *PCI Journal*, 1989, vol. 34, no. 11, pp. 54-91.
9. Kahn L. F., Lopez M. Prestress losses in high performance lightweight concrete pretensioned bridge girders. *PCI Journal*, 2005, vol. 50, no. 5, pp. 84-94.
10. CEB-FIP MC 90 *Model Code for Concrete Structures* [Comite Euro-International du Beton – Federation Internationale de la Precontrainte (CEB-FIP)]. London, UK, 1993.

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. А. І. Лантухом-Лященко (Україна), д.т.н., проф. А. В. Радкевичем (Україна).

Поступила в редколлегию 22.11.2016.

Принята к печати 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.131.212./34:69.035.4

О. І. МЕНЕЙЛЮК^{1*}, А. Ф. ПЕТРОВСЬКИЙ², О. О. БОРИСОВ³, І. М. БАБІЙ⁴

^{1*} Кафедра технології будівельного виробництва, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (048) 723 61 51, ел. пошта pr.mai@mail.ru, ORCID 0000-0002-1007-309X

² Кафедра технології будівельного виробництва, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, ел. пошта raf2012@ukr.net, ORCID 0000-0001-9548-1959

³ Кафедра технології будівельного виробництва, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (094) 949 20 83, ел. пошта etinvest@gmail.com, ORCID 0000-0001-6930-3243

⁴ Кафедра технології будівельного виробництва, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (094) 994 09 69, ел. пошта igor_babiy76@mail.ru, ORCID 0000-0001-8650-1751

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ РОЗЧИНУ ДЛЯ ІН'ЄКЦІЇ ПІСЧАНОГО ГРУНТУ

Мета. Метою даного дослідження є вивчення властивостей отриманого екрана. У даній роботі представлено інтерес вивчити міцність на стиск отриманих ґрунтобетонів. Завдання, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети такі: підбір і визначення рецептурного складу, а також варіювання технологічних режимів ін'єкції. **Методика.** Створення всередині піщаного масиву міцного горизонтального екрану в умовах, коли змінюються технологічні параметри. Метод проведення технологічних досліджень: аналітично-експериментальний. **Результати.** Аналіз моделі показав, що при відносно низькому тиску ін'єктування (1 МПа) і при невеликому часі ін'єктування (4 хв.) можливо, отримувати ґрунтобетони з достатньою міцністю при стисканні від 3 МПа і вище, що відповідає вимогам нормативних документів. Встановлено, що збільшення тиску ін'єктування, а також часу ін'єкції в ґрунт (пісок) призводить до збільшення міцності при стисненні ґрунтобетонів, приготованих на основі модельного піску з $M_{кр} = 1,8$. **Наукова новизна.** За результатами роботи отримано оптимізовані значення міцності на стиск зразків захисного ґрунтобетонного екрану. **Практична значимість.** Практичною значимістю результатів є визначення оптимальних технологічних параметрів процесу ін'єкції та рецептурного складу розчину. Це дає можливість робити ін'єкцію пісчастих ґрунтів з отриманням ґрунтобетону з зазначеними властивостями.

Ключові слова: захист підземного простору; горизонтально-спрямоване буріння; цемент; водопроникність; експериментально-статистичне моделювання

Вступ

Багато сховищ відходів в Україні і місця їх розміщення, не відповідають санітарно-гігієнічним вимогам [1,2]. Часто на них відсутні або пошкоджені конструкції, що запобігають фільтрації забруднених стоків в ґрунти і ґрунтові води. Як правило, вони не відповідають вимогам нормативних документів щодо забезпечення їх безпечної експлуатації. Завдання локалізації джерел забруднення ґрунтів, запобігання поширенню техногенних стоків і підтоплення територій і заглиблених споруд сьогодні вирішуються із застосуванням технологій зведення вертикальних протифільтраційних екра-

нів, які, для забезпечення ефективної роботи, повинні бути, як правило, заглиблені в водотривкі шари ґрунтів. Вимоги до таких технологій і екранів досить широко представлені в нормативних документах [3]. У той же час, за відсутності водотривкого шару ґрунту або його розташуванні на практично недосяжній глибині, для запобігання поширенню забруднених стоків потрібно влаштування штучного водотривкого шару (протифільтраційного екрану) в ґрунті під існуючим джерелом забруднення. В даний час конструктивно-технологічні вимоги до технології влаштування протифільтраційних екранів під існуючими спорудами відсутні в нормативних документах і рекомендаціях, а

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

можливість застосування таких технологій не обґрунтована системними дослідженнями [4-7].

Дане дослідження спрямоване на розробку технології влаштування протифільтраційних екранів, в тих випадках, коли відсутній або знаходиться на великій глибині природний водотривкий шар. Результати даного дослідження є актуальними тому, що вирішують важливу екологічну і соціальну проблему захисту підземного простору і ґрунтових вод від різного роду забруднень.

Мета та завдання дослідження

Метою даного дослідження є вивчення властивостей отриманого ґрунтобетонного протифільтраційного екрана. Такі конструкції повинні володіти рядом заданих фізико-механічних властивостей. У даній роботі представляло інтерес вивчити міцність на стиск отриманої ґрунтобетонної конструкції. Завдання, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети такі: підбір і визначення рецептурного складу, а також варіювання технологічних режимів ін'єктування.

Об'єкт і методи досліджень

Створення всередині піщаного масиву міцного горизонтального екрану в умовах, коли змінюються технологічні параметри. Метод проведення технологічних досліджень: аналітично-експериментальний.

Основні результати

З метою зниження витрат приготування високодисперсних суспензій ін'єкційних розчинів повинно здійснюватися спільно з тонкодисперсними мінеральними добавками і суперпластифікаторами [8, 9]. Застосування останніх дозволяє знизити ефективну в'язкість суспензій ін'єкційних в'язучих і різко знизити седиментацію. Це повинно бути досягнуто за рахунок гомогенізації суміші.

Можливості підвищення міцності ґрунтобетону, створення більш щільної упаковки зерен, можуть бути здійснені шляхом цілеспрямованого впливу технологічних факторів на його структуру. Такими факторами є як сам склад ґрунтобетонів, так і технологічні рішення, що застосовуються при його отриманні.

У даній роботі представляло інтерес оптимізувати склади ґрунтобетонів, а також встанови-

ти вплив технологічних факторів на їх фізико-механічні характеристики.

Дослідження проводилися по 18-ти точковому чотирьохфакторному D-оптимальному плану [10].

Нормалізація усіх факторів складу бетону виконана за стандартними формулами [10]:

$$x_i = (X_i - X_{0i}) / \Delta X_i, \quad (1)$$

де $X_{0i} = 0,5(X_{i,\max} + X_{i,\min})$,

$\Delta X_i = 0,5(X_{i,\max} - X_{i,\min})$.

В експерименті варіювалися такі незалежні фактори як:

$X_1 = 450 \pm 100$ – витрата в'язучого в ґрунтобетоні, кг/м³;

$X_2 = 10 \pm 10$ – кількість наповнювача, %;

$X_3 = 3 \pm 2$ – тиск нагнітання розчину, МПа;

$X_4 = 3 \pm 1$ – час нагнітання, хв.

Звертає на себе увагу той факт, що для кубічного метра ґрунтобетону прийнята досить велика кількість в'язучого. Це пояснюється тим, що в пробуреній свердловині знаходиться досить велика кількість бентонітового розчину, частинки якого необхідно пов'язати в один щільний конгломерат. Таким чином, отриманий в результаті цього композитний ґрунтобетон повинен володіти необхідними для протифільтраційного екрана властивостями, а саме міцністю при стисканні.

В якості наповнювача, був використаний мелений кварцовий пісок (X_2), з питомою поверхнею $S_{уд} = 300$ м²/кг. Ця дисперсність наповнювача була зумовлена відносно недорогим помолом.

Вплив вмісту наповнювача на властивості цементного каменю досліджувалися в роботах багатьох авторів [11, 12]. Однак, згідно з [13], просте перенесення оптимальних значень ступеня наповнення цементних суспензій на бетон є некоректним, тому що частина в'язучого витрачається на обволікання зерен заповнювача і зчеплення з ними, то концентрація меленого кварцового піску в в'язкому знову була прийнята в якості рецептурного фактора. При цьому необхідно врахувати, що портландцемент є одним з найдорожчих в'язучих компонентів.

Як добавки пластифікатора в бетонну суміш використовувався розріджувач С-3 в кількості 0,8 % (в перерахунку на суху речовину) від ма-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

си в'язучого. Як зазначалося раніше, застосування даної досить дорогої і ефективної добавки викликано необхідністю отримання ін'єкційного розчину із заданою в'язкістю, за умови збереження або часткового зменшення фізико-механічних властивостей затверділого розчину.

Як еталонний склад ґрунтів прийнятий кварцовий пісок з $M_{кр} = 1,8$.

Приготування ґрунтобетонних сумішей відбувалося в такій послідовності.

При приготуванні ґрунтобетонних сумішей попередньо отримана суспензія в'язучого, отримана спільним змішанням, послідовно введені води з добавкою С-3, портландцементу і меленого кварцового піску, в швидкісному змішувачі, нагніталася в ємкість, заповнену немолотим кварцовим піском, змішаним в співвідношенні 70/30 з глинистим розчином.

В результаті реалізації експерименту отримана експериментально-статистична модель, яка описує досліджуваний показник якості ґрунтобетонів.

Вплив технологічних факторів на експлуатаційні характеристики ґрунтобетонів.

Якість ґрунтобетонів в великій мірі залежить від використовуваних матеріалів. Правильний підбір матеріалів для ін'єктування ґрунту, що враховує як вимоги до ґрунтобетонів, так і властивості самих матеріалів, - важливий етап в проектуванні технологічного процесу. Властивості використовуваних матеріалів повинні задовольняти відповідним державним стандартам і технічним умовам.

Фізико-механічні властивості ґрунтобетонів визначаються в основному його структурою і рівномірністю розподілу цементної суспензії в порах піску. Після ін'єктування цементної суспензії в ній починають відбуватися суттєві зміни, які призводять до кінцевих властивостей матеріалу. Ці зміни викликаються як зовнішніми силами, що діють при перемішуванні і ущільненні в поровому просторі, так і внутрішніми фізико-хімічними процесами, в першу чергу гідратацією цементу [12].

Важливим фактором, що впливає на гідратацію цементу, а, отже, на міцність композиту в цілому є рецептурний склад і режими ін'єктування.

В результаті реалізації експерименту була досліджена кінетика набору міцності при стис-

ненні $f_{ck.cube}$ ґрунтобетонів при різних режимах ін'єктування.

Модель відображає вплив рецептурно-технологічних факторів. Аналіз моделі показує, що при відносно низькому тиску ін'єктування (1 МПа) і при невеликому часу ін'єктування (4 хв.) Можливо, отримувати ґрунтобетони з достатньою міцністю при стисканні від 3 МПа і вище, що відповідає вимогам нормативних документів.

У свою чергу максимальних значень міцності при стисненні $f_{ck.cube} = 7,2$ МПа ґрунтобетон досягає при збільшенні тиску до 5 МПа і часу ін'єкції 4 хв.

Цікаво відзначити, що збільшення тиску ін'єктування з 1 до 5 МПа призводить до підвищення міцності з 1,8 до 5,7 МПа (тобто майже в 3,2 рази). У той же час при збільшенні тиску з 1 до 3 МПа, при фіксованих значеннях варійованих факторів, підвищення міцності спостерігається в 2 рази. Подальше підвищення тиску призводить до підвищення міцності вже до 2,5 раз. Це може бути викликано тим, що в першому випадку при низькому тиску цементна суспензія намагається заповнити вільний простір між частинками піску, а по-другому випадку - струмінь при високому тиску ін'єкції розсовує частинки піску, і тим самим в загальному обсязі переважає більшу кількість цементної суспензії.

Наукова новизна та практична значимість

За результатами роботи отримано оптимізовані значення міцності на стиск зразків захисного ґрунтобетонного екрану. Також визначені оптимальні технологічні параметри процесу ін'єкції та рецептурний склад розчину.

Висновки

1. Проведено дослідження по оптимізації складів ґрунтобетонів, які можливо застосовувати для ін'єкційної технології.

2. В результаті реалізації експерименту отримано комплекс експериментально-статистичних моделей, які описують основні показники якості ґрунтобетонів.

3. Аналіз моделі показує, що при відносно низькому тиску ін'єкції (1 МПа) і при невеликому часі ін'єкції (4 хв.) Можливо, отримувати ґрунтобетон з достатньою міцністю при стис-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

канні від 3 МПа і вище, що відповідає вимогам нормативних документів.

4. Установлено, що збільшення тиску ін'єктування, а також часу ін'єкції в ґрунт (пісок) призводить до збільшення міцності при стисненні ґрунтобетонів, приготованих на основі модельного піску з $M_{кр} = 1,8$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вальков, В. Ф. Экология почв: Учебное пособие для студентов вузов. Часть 3. Загрязнение почв [Текст] / В. Ф. Вальков, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников. – Ростов-на-Дону : УПЛ РГУ, 2004. – 54 с.
2. Завальный, А. П. Мероприятия по охране подземных вод при эксплуатации накопителей промышленных отходов [Текст] / А. П. Завальный // Вісник Харківського національного університету імені В. М. Карамзіна. – Харків, 2013. – № 1084. – С. 217-223.
3. Пособие по проектированию полигонов по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов (к СНиП 2.01.28-85) [Текст]. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 48 с.
4. Бойко, Г. А. Применение тонких противофильтрационных диафрагм в условиях Белоруссии. Строительство и архитектура Белоруссии [Текст] / Г. А. Бойко, Г. Г. Азбель, Г. Н. Никольская. – 1980. – № 4. – С. 31.
5. Бунтман, А. Д. Об использовании противофильтрационных завес для защиты котлованов от притока грунтовых вод [Текст] / А. Д. Бунтман // Энергетическое строительство. – 1978. – № 2. – С. 86-87.
6. Пат. 2015248 С1 Российская Федерация, МПК5 Е 02 D 3/12. Способ создания противофильтрационной завесы в лессовом грунте [Текст] / В. И. Осипов, С. Д. Филимонов, Б. Н. Мельников, Е. В. Кайль; заявл. 27.12.91 ; опубл. 30.06.94.
7. Пат. 2206663 С1 Российская Федерация, МПК7 Е 02 D 5/56, 5/20, 7/22. Способ возведения ограждающей противофильтрационной инженерно-защитной конструкции (варианты) [Текст] / А. Н. Басиев, М. В. Зелов, А. Г. Икусов; заявл. 21.12.2001 ; опубл. 20.06.2003.
8. Выровой, В. Н. Механизм формирования внутренних поверхностей композиционных материалов [Текст] // Применение цементных и асфальтовых бетонов в Сибири : сб. научн. трудов. – Омск : Сиб. АДИ, 1983. – С. 3-10.
9. Ратинов, В. Б. Добавки в бетон [Текст] / В. Б. Ратинов, Г. И. Розерберг. – Москва : Стройиздат, 1989. – 186 с.
10. Вознесенский, В. А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ [Текст] / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, Б. Л. Огарков. – Київ : Вища школа, 1989. – 327 с.
11. Дзенис, В. В. О виброобработке песчаного бетона с микронаполнителем [Текст] / В. В. Дзенис // Исследования по бетону и железобетону. – Рига, 1959. – Вып. 4. – С. 59-70.
12. Соломатов, В. И. Бетон как композиционный материал (обзор) [Текст] / В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, Н. А. Аббасханов. – Ташкент : УзНИИТИ, 1984. – 31 с.
13. Адылходжаев, А. И. Основы интенсивной раздельной технологии бетона [Текст] / А. И. Адылходжаев, В. И. Соломатов. – Ташкент : Фан, 1983. – 213 с.

А. И. МЕНЕЙЛЮК^{1*}, А. Ф. ПЕТРОВСКИЙ², А. А. БОРИСОВ³, И. Н. БАБИЙ⁴

^{1*} Кафедра технологии строительного производства, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (048) 723 61 51, эл. почта rg.mai@mail.ru, ORCID 0000-0002-1007-309X

² Кафедра технологии строительного производства, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, эл. почта raf2012@ukr.net, ORCID 0000-0001-9548-1959

³ Кафедра технологии строительного производства, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (094) 949 20 83, эл. почта etinvest@gmail.com, ORCID 0000-0001-6930-3243

⁴ Кафедра технологии строительного производства, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (094) 994 09 69, эл. почта igor_babiy76@mail.ru, ORCID 0000-0001-8650-1751

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА РАСТВОРА ДЛЯ ИНЪЕКЦИИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Цель. Целью данного исследования является изучение свойств полученного раствора. В данной работе представляло интерес изучить прочность на сжатие полученных ґрунтобетонів. Задачи, которые необходи-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

мо решить для достижения поставленной цели следующие: подбор и определение рецептурного состава, а также варьирование технологических режимов инъекции. **Методика.** Создание внутри песчаного массива прочного горизонтального экрана в условиях, когда меняются технологические параметры. Метод проведения технологических исследований: аналитически-экспериментальный. **Результаты.** Анализ модели показал, что при относительно низком давлении инъекции (1 МПа) и при небольшом времени инъекции (4 мин.) Возможно, получать грунтобетоны с достаточной прочностью при сжатии от 3 МПа и выше, что соответствует требованиям нормативных документов. Установлено, что увеличение давления, а также времени инъекции в грунт (песок) приводит к увеличению прочности при сжатии грунтобетонных, приготовленных на основе модельного песка с $M_{кр} = 1,8$. **Научная новизна.** По результатам работы получены оптимизированные значения прочности на сжатие образцов защитного грунтобетонного экрана. **Практическая значимость.** Практической значимостью результатов является определение оптимальных технологических параметров процесса инъекции и рецептурного состава раствора. Это дает возможность инъецировать песчаные грунты с получением грунтобетона с заданными свойствами.

Ключевые слова: защита подземного пространства; горизонтально-направленное бурение; цемент; водопроницаемость; экспериментально-статистическое моделирование

A. MENEYLYUK^{1*}, A. PETROVSKYI², A. BORISOV³, I. BABIJ⁴

^{1*} Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (048) 723 61 51, e-mail pr.mai@mail.ru, ORCID 0000-0002-1007-309X

² Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, e-mail paf2012@ukr.net, ORCID 0000-0001-9548-1959

³ Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (094) 949 20 83, e-mail etinvest@gmail.com, ORCID 0000-0001-6930-3243

⁴ Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (094) 997 09 69, e-mail igor_babiy76@mail.ru, ORCID 0000-0001-8650-1751

DETERMINATION OF THE OPTIMAL SOLUTION FOR INJECTION OF SANDY SOIL

Purpose. The aim of this study is to investigate the properties of the resulting screen. In this paper, it was of interest to study the compression strength of derived soil-concrete. The tasks that need to be addressed to achieve the following objectives: the selection and determination of the composition of the prescription, as well as the variation of technological modes of injection. **Methodology.** Establishment of the sand massif lasting horizontal screen in circumstances where process parameters are changed. Method of technological research: analytical and experimental. **Findings.** Analysis of the model showed that at relatively low injection pressure (1 МПа) and at low injection time (4 min.) makes it possible to deliver soil-concrete with sufficient compression strength of 3 МПа or higher that meets regulations. An increase of pressure and the time of injection into the soil (sand) increases the compression strength of soil-prepared based on a model of sand with $M_{кр} = 1,8$. **Originality.** The result of the optimized values obtained compression strength of samples of soil-concrete protective screen. **Practical value.** The practical significance of the results is the definition of optimal technological parameters of the injection process and the prescription of the solution composition. This makes it possible to inject the sandy soil to give soil-concrete with specified properties.

Keywords: protection of underground space; horizontal directional drilling; cement; water permeability; experimental and statistical modeling

REFERENCES

1. Valkov V. F., Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I. *Ekologiya pochv: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. Chast 3. Zagryaznenie pochv* [Soil Ecology: Textbook for university students. Part 3 Soil pollution]. Rostov-na-Donu, UPL RGU Publ., 2004. 54 p.
2. Zavalniy A. P. *Meropriyatiya po okhrane podzemnykh vod pri ekspluatatsii nakopiteley promyshlennykh otkhodov* [Measures to protect groundwater in the operation of industrial waste storage]. *Visnik Kharkivskogo natsionalnogo universitetu imeni V.M. Karamzina* [Bulletin of Kharkiv National University named V.N. Karamzin], 2013, no. 1084. pp. 217-223.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

3. *Posobie po proektirovaniyu poligonov po obezvrezhivaniyu i zakhoroneniyu toksichnykh promyshlennykh otkhodov (k SNiP 2.01.28–85)* [Manual for the design of landfills for the disposal and dumping of toxic industrial waste (to the SNiP 2.01.28-85)]. Moscow, TsITP Gosstroya USSR Publ., 1990. 48 p.
4. Boyko G. A., Azbel G. G., Nikolskaya G. N. *Primenenie tonkikh protivofiltratsionnykh diafragm v usloviyakh Belorussii* [The use of thin anti-filtration diaphragms in the conditions of Belarus]. *Stroitelstvo i arkhitektura Belorussii – Construction and Architecture of Belarus*, 1980, no. 4, p. 31.
5. Butman A. D. *Ob ispolzovanii protivofiltratsionnykh zaves dlya zashchity kotlovanov ot pritoka gruntovykh vod* [On the use of impervious curtain to protect the pits from groundwater inflow]. *Energeticheskoe stroitelstvo – Power Engineering construction*, 1978. no. 2, pp. 86-87.
6. Osipov V. I., Filimonov S. D., Melnikov B. N., Kayl Ye. V. *Sposob sozdaniya protivofiltratsionnoy zavesy v lessovom grunte* [A method for creating grout curtain in the loess soils]. Patent 2015248 S1 RF, MPK5 E 02 D 3/12
7. Basiev A. N., Zelov M. V., Ikusov A. G. *Sposob vozvedeniya ograzhdayushchey protivofiltratsionnoy inzhenerno-zashchitnoy konstruksii (varianty)* [A method of erecting fencing of an anti-protection engineering design (options)]. Patent 2206663 S1 RF, MPK7 E 02 D 5/56, 5/20, 7/22
8. Vyrovoy V. N. *Mekhanizm formirovaniya vnutrennikh poverkhnostey kompozitsionnykh materialov* [The mechanism of formation of the internal surfaces of composite materials]. *Primenenie tsementnykh i asfaltovykh betonov v Sibiri: Sb-nik nauchn. trudov – The use of cement and asphalt concrete in Siberia: Collection of Scientific. Works*, 1983, pp. 3-10.
9. Ratinov V. B., Rozerberg G. I. *Dobavki v beton* [Concrete admixtures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989. 186 p.
10. Voznesenskiy V. A., Lyashenko T. V., Ogarkov B. L. *Chislennyye metody resheniya stroitelno-tekhnologicheskikh zadach na EVM* [Numerical methods for solving construction and technological problems on a computer]. Kyjiv, Vyshha shkola Publ., 1989. 327 p.
11. Dzenis V.V. *O vibroobrabotke peschanogo betona s mikronapolnitelem* [About vibroobrabotke sandy concrete microfiller] *Issledovaniya po betonu i zhelezobetonu – Research on concrete and reinforced concrete*, 1959, vol. 4, pp. 59-70.
12. Solomatov V. I., Vyrovoy V. N., Abbaskhanov N. A. *Beton kak kompozitsionnyy material (obzor)* [Concrete as a composite material (review)]. Tashkent, UzNIINTI Publ., 1984. 31 p.
13. Adylkhodzhaev A.I., Solomatov V.I. *Osnovy intensivnoy razdelnoy tekhnologii betona* [Basics Intensive separate concrete technology]. Tashkent, Fan Publ., 1983. 213 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н, проф. В. О. Галушко, (Україна), д.т.н., проф. О. Л. Тютюкіним (Україна).

Надійшла до редколегії 26.11.2016.

Прийнята до друку 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

UDC 658.012.32/.014.1:725.3

A. MENEYLUYK¹, A. NIKIFOROV^{2*}

¹ Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, ORCID 0000-0002-1007-309X

^{2*} Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (066) 330 90 54, e-mail aleksey-nikiforov@mail.ua, ORCID 0000-0001-7002-7055

MULTIDIMENSIONALITY OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL MANAGEMENT OF TRANSPORT FACILITIES CONSTRUCTION ENTERPRISE

Purpose. Justify the relationship of organizational and technological solutions of the transport facilities construction in the management of the enterprise as a whole and decisions on individual projects and submit this relationship in the form of a multidimensional organization structure. **Methodology.** Synthesis, analysis, combinatorial and morphological analysis. **Findings.** The model of business processes relationship, multidimensional organizational structure of such enterprises are developed and analyzed. The possibility of developing a computer model of operating activity of the organization in question is substantiated. **Originality.** Specific factors of the enterprise structure management and methods of the construction enterprise management are highlighted for the first time, their interaction is described. **Practical value.** Optimization of organizational and technological solutions, made in the management of the enterprise as a whole and decisions of individual projects.

Keywords: erection of transport facilities; business processes; multidimensional organizational structure; organizational and technological solutions; numerical optimization

Introduction

A large number of infrastructure facilities and structures represent transport industry in Ukraine. Many of them need repair works, reconstruction or at least continuous monitoring. Specific conditions of realization of transport facilities construction projects and the analysis of the traditional organizational structures of management show that the management structures of specialized enterprises require appropriate organizational transformation. This transformation will increase the efficiency of management practices of such enterprises. As a result, the study of organizational management structures of the transport facilities construction enterprises is an urgent task.

Purpose

Justify the relationship of organizational and technological solutions of the transport facilities construction in the management of the enterprise as a whole and decisions on individual projects and submit this relationship in the form of a multidimensional organization structure.

The objectives of the work:

1. Develop a three-stage scheme of consistent modeling of the operating activities of the transport facilities construction enterprise.
2. Analyze the business processes relationship model of the enterprise under consideration.
3. Develop a multidimensional organizational structure, which simulates the relationship of organizational and technological solutions of the transport facilities construction in the management of the enterprise as a whole and decisions on individual projects.
4. To prove the possibility of numerical optimization of organizational and technological solutions of this enterprise by developing a computer model of its operating activity in the graphical-analytical form.

Analysis of the literature

Currently, Ukrainian railways operate about 19, 5 thousand man-made structures. Among them, there are about 7500 railway bridges, 11000 tubes and trays, 80 tunnels, overpasses, pedestrian bridges and other engineering structures [5]. These facil-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ities are located throughout the territory of Ukraine and can be different in scale [13]. However, many of them need repair works, reconstruction or at least continuous monitoring [1, 12].

The development of Ukrainian transport infrastructure requires arrangement of specialized transport facilities, which are characterized by different geographical dispersion and production scale of the works necessary for their construction.

Analysis of organizational structures types of enterprises showed that the most common types are linear, linear-staff, project, matrix, multidimensional. The difference of these structures lies in different priorities of vertical and horizontal managerial relationships between their elements. Matrix and at most multidimensional structures have the highest priority of horizontal relations among the considered structures. The development of such relations is effective in the variable environment in which the company sells its activity [14].

It is advisable to use a simulation to improve construction activity. The most effective for the simulation of the operating activity of the enterprises is to build analytical, deterministic, optimizing, imitative, static, correlative-regressive, network models [4, 16].

The following works are dedicated to numerical simulation and optimization of organizational and technological solutions of construction and reconstruction [6, 7, 8, 9, 15, 17]. They proved that the key to the effectiveness of the optimization is the validity of computer models of the object.

The fundamental works on the organization of construction process proved that there is a correlation between the management processes of the organization and construction projects [3, 10]. It is proposed [11], that the operations of construction enterprises may be modeled using multidimensional organizational structures.

In accordance with the common approach [2], a phased sequential development of conceptual, logical and physical models provides consistency and simplicity for modeling of enterprises. At each step, the models are specified, detailed and focused on the most important in the framework of the factors and relationships study.

Methodology

Fig. 1 shows a block diagram of a three-stage development of operating activity models of the transport facilities construction enterprise.

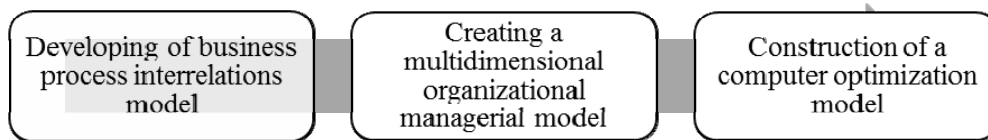


Fig. 1. Block diagram of a phased development of models of the operating activities of the enterprise for the construction of transport facilities

When analyzing the information sources it was identified the feasibility of a phased modeling of the enterprise operating activity. Each successive stage of the modeling is a continuation of the previous one, complements it and refines it. The minor details can be removed. Let us open the main stages of the developed diagram (Fig. 1.)

– Developing of business process interrelations model – is a stage of conceptual modeling, which identifies the main factors of the enterprise operating activity and the relationships between them. At this stage, it is necessary to structure the totality of the studied factors and identify specific impacts of transport facilities construction process.

– Creating a multidimensional organizational managerial structure – is a stage of logic simulation, which describes the operational activity of the reporting enterprise. It is a core of business process, through which the company creates product. At this stage, it is justified in the present work the relationship of organizational and technological solutions of the transport facilities construction in the management of the enterprise as a whole and decisions on individual projects. The model also describes the major modifiable factors and the studied parameters of construction product.

– Construction of a computer optimization model – is a physical modeling phase, which formalizes the operating activity of the enterprise in

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

question and substantiates the possibility to optimize such activity using a computer model.

Findings

Model of business processes interrelations for the transport facilities construction enterprise is shown in Fig. 2.

Abbreviations used are presented in Tab. 1.

The factors in the model are grouped in three areas: external factors (F_{ext}), factors of the immediate environment ($F_{i,env}$) and internal factors of

the enterprise (F_{int}). In the present structure (Fig. 2), the internal factors can be divided into two categories: factors of the management structure and management methods factors. The first category includes "departments of a construction company" and "resources for building production"; second – "management of construction enterprise" and "management of construction projects". Allocation of factors into two categories was done due to the following.

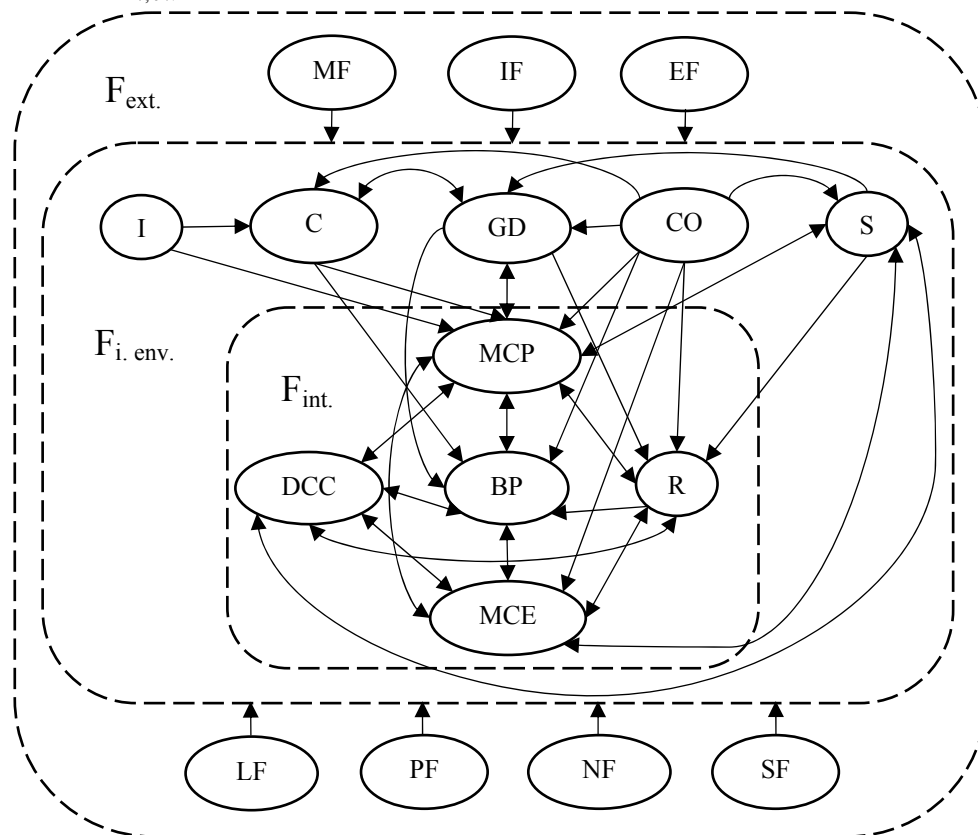


Fig. 2. Model of business processes interrelations for the transport facilities construction enterprise

Widespread department structure of construction companies hardly varies depending on the type of construction organization (building the industrial or civil objects) and on the specific strategic decisions at the enterprise management. The structure of the resources used in the manufacture of building production (labor, material, technical, intellectual, financial resources, and technologies), is not related to the organizational and technological solutions applied on individual sites. At the same, though management structure factors may affect the management methods factors, but this influence is much smaller than the impact of man-

agement methods factors on management structure factors. This allows us to consider the management structure factors like the subsystem of management methods factors. Thus, both categories have their own specificity, though related.

The novelty of the proposed model is as follows:

- at first such factors of the internal environment of the construction enterprise as "management of construction company" and "management of construction projects" were highlighted, and the relationship between them were described;

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- at first time the factors of management structure and management methods (factors "management of construction organization" and "departments of construction company", "management of construction project" and "resources for the building production") were highlighted on the example of the transport facilities construction enterprise;
- at first the specific factors of internal and external environment of the business processes of transport facilities construction enterprise were highlighted.

Table 1

List of abbreviations

Abbr.	Definition	Abbr.	Definition
BP	building product	WBS	work breakdown structure
DCC	departments of construction company	MCE	management of construction enterprise
R	resources for the building production	MCP	management of construction project
I	investor	C	customer
GD	general designer	CO	controlling organizations
S	suppliers	LF	legal factors
MF	market factors	PF	political factors
IF	information factors	NF	natural factors
EF	economic factors	SF	social factors
X_1	average labor input of the totality of projects	X_3	membership of resources used
X_2	average distance relocation	X_4	industriality of applied solutions
$\{Y_{\text{tech.}}\}$	indicators of technical efficiency	$\{Y_{\text{ecol.}}\}$	indicators of ecological efficiency
$\{Y_{\text{econ.}}\}$	indicators of economic efficiency	$\{Y_{\text{soc.}}\}$	indicators of social efficiency
Y_1	change in total production costs	Y_{3-i}	cost of building production unit
Y_2	ratio of direct and general production costs	$\ni$	operator of the affiliation to the superset
$\{Y\}$	plurality of elements Y	$\wedge$	operator of conjunction ("and")
$\cap$	"intersection" operator	$\supset$	"includes" operator
$\cup$	"association" operator	$\supseteq$	"strictly includes" operator

The relationship between the management of the construction organizations in general and individual construction project management was examined in the analysis information sources. In some of the reviewed works, this relationship was established as a one-sided influence of organizational and technological reliability of the ongoing construction project on the management intensity peaks within the enterprise. In the other – as the impact of market environment of construction projects realization on the formation of the optimal

portfolio of construction organization. It is obvious that the change of organizational and technological solutions in the management of the enterprise influences these decisions on individual construction sites, and vice versa. For example, the company focus on the implementation of a specific totality of projects leads to the need to create the appropriate material and technical base. This in turn limits the possible technological solutions. Also, the choice of certain organizational and technological schemes necessitates the adaptation of means and

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

methods of enterprise management, and may also require changes to the company structure. This causes necessity to allocate specific factors while making the organizational and technological solutions at the enterprise level or individual objects and find the relationships between them and the characteristics of building production.

In general terms, Fig. 2 can be described by the following expressions (1-2):

$$\begin{cases} F_{ext.} \ni \{MF, IF, EF, LF, PF, NF, SF\} \\ F_{i.env.} \ni \{I, C, GD, CO, S\} \\ F_{int.} \ni \{MCE, MCP, DCC, R, BP\} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} (F_{i.env.} \cup F_{int.}) = f(F_{ext.}) \\ (F_{i.env.} = f(F_{int.})) \wedge (F_{int.} = f(F_{i.env.})) \end{cases}. \quad (2)$$

It is possible to allocate the following when analyzing the external factors of the transport facilities construction enterprise (3-6)

$$MF \cap NF = F_{ter.}, \quad (3)$$

$$MF \ni F_{sc.}, \quad (4)$$

$$IF \ni F_{tech.}, \quad (5)$$

$$SF \ni F_{cont.}. \quad (6)$$

The impact of factors of the immediate environment on internal factors of the transport facilities construction enterprise in general does not differ from the effect on the internal factors of traditional construction organizations. However, the effect of specific external factors interacts these changes to some extent (Formula 7):

$$S = \begin{cases} f(F_{ter.}) \\ f(F_{sc.}) \\ f(F_{cont.}) \end{cases}. \quad (7)$$

Other factors of immediate environment can be omitted from consideration. Thus, the model of studied business processes interrelations for the transport facilities construction enterprise takes the following form (Fig. 3).

Impact of the studied external factors on the internal factors of enterprise in question can be described by the following system of equations (8)

$$\begin{cases} (MCP = f(F_{sc.})) \cap (MCE = f(F_{sc.})) = X_1 \\ (MCP = f(F_{ter.})) \cap (MCE = f(F_{ter.})) = X_2 \\ (MCP = f(F_{cont.})) \cap (MCE = f(F_{cont.})) \cap (R = f(F_{cont.})) = X_3 \\ (MCP = f(F_{tech.})) \cap (MCE = f(F_{tech.})) \cap (R = f(F_{tech.})) = X_4 \end{cases} \quad (8)$$

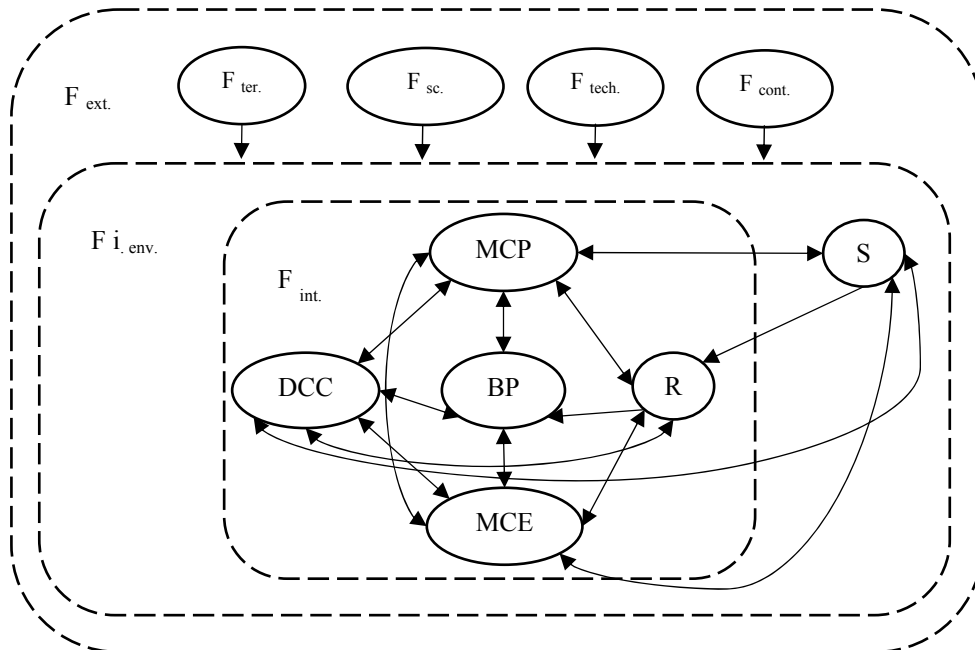


Fig. 3. Model of studied business processes interrelations of the transport facilities construction enterprise

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

The relationship between internal factors of the transport facilities construction enterprise can be described by the following equations (9)

$$\begin{cases} (MCE \ni \{X_1, X_2\}) \cup (MCP \ni \{X_3, X_4\}) \\ WBS = f(MCP \subset R) \\ MCE \subset DCC \end{cases} \quad (9)$$

Building product can be described as a set of indicators imposed on it. Thus, the performance of this product must demonstrate the effectiveness of operating activity at the level of individual projects and their combination. It can be written (10)

$$BP \supseteq \{\{Y_{tech.}\}, \{Y_{econ.}\}, \{Y_{ecol.}\}, \{Y_{soc.}\}\} \quad (10)$$

The cost of the project, totality of projects or the cost of expenditure items reflect the efficiency of project management and enterprise management as a whole in the most complete way when making organizational and technological solutions. The specifics of the considered transport facilities construction project is that general production expenses, payroll costs and operation of machinery and equipment dominate the cost structure. Furthermore, the area of construction industry under consideration is characterized by the creation of various kinds of building production. In this regard, it is suggested to use the following indicators:

– Changing of the full production costs (Y_1)
– percentage change in the total production cost, depending on the influence of organizational and technological factors. Full production costs are the sum of direct and general production costs.

– Ratio of direct and general production costs (Y_2) – the percentage of the amount of general production costs to the sum of the direct costs of the totality of projects.

– Cost per unit of building production (Y_{3-i}) – the direct costs necessary for the unit of building production. The cost price can be calculated for the main types of production: load-bearing metal structures (1 t.); installation of technological equipment (1 u.) and so on.

Thus, it can be written for the present study (11)

$$BP \supseteq \{Y_1, Y_2, Y_{3-i}\} \quad (11)$$

Tab. 2 analyzes the main factors that change the operating activity structure of the transport facilities construction company. The factors X_1 and X_2 are business management practices of the enterprise in general, X_3 and X_4 – management techniques for individual construction projects.

Varying factors and indicators, which were considered, as well as the internal factors may be presented in the form of multidimensional organizational managerial model of the transport facilities construction enterprise (Fig. 4).

Table 2

Variable factors

Factor name	The essence, definition of the factor	Variation feature
X_1 – average labor input of the totality of projects	Simulates the course of the company: focus on the implementation of large, medium or small projects	The arithmetic average of labor input of construction and installation works of the totality of projects, min. UAH
X_2 – average distance relocation	Simulates the company focus on the implementation of projects considerably or slightly distant from each other	The arithmetic average of resources relocation distances between any of two projects of the totality, km
X_3 – membership of resources used	Simulates the company focus on the use of its own resources or contractors. Used for manpower and machinery	The percentage of own resources use of total resources
X_4 – industriality of applied solutions	Changes the labor input of work using industrial methods of construction: the use of prefabricated materials, the methods of mass production, the degree of mechanization	The percentage of use of industrial methods in the total volume of work

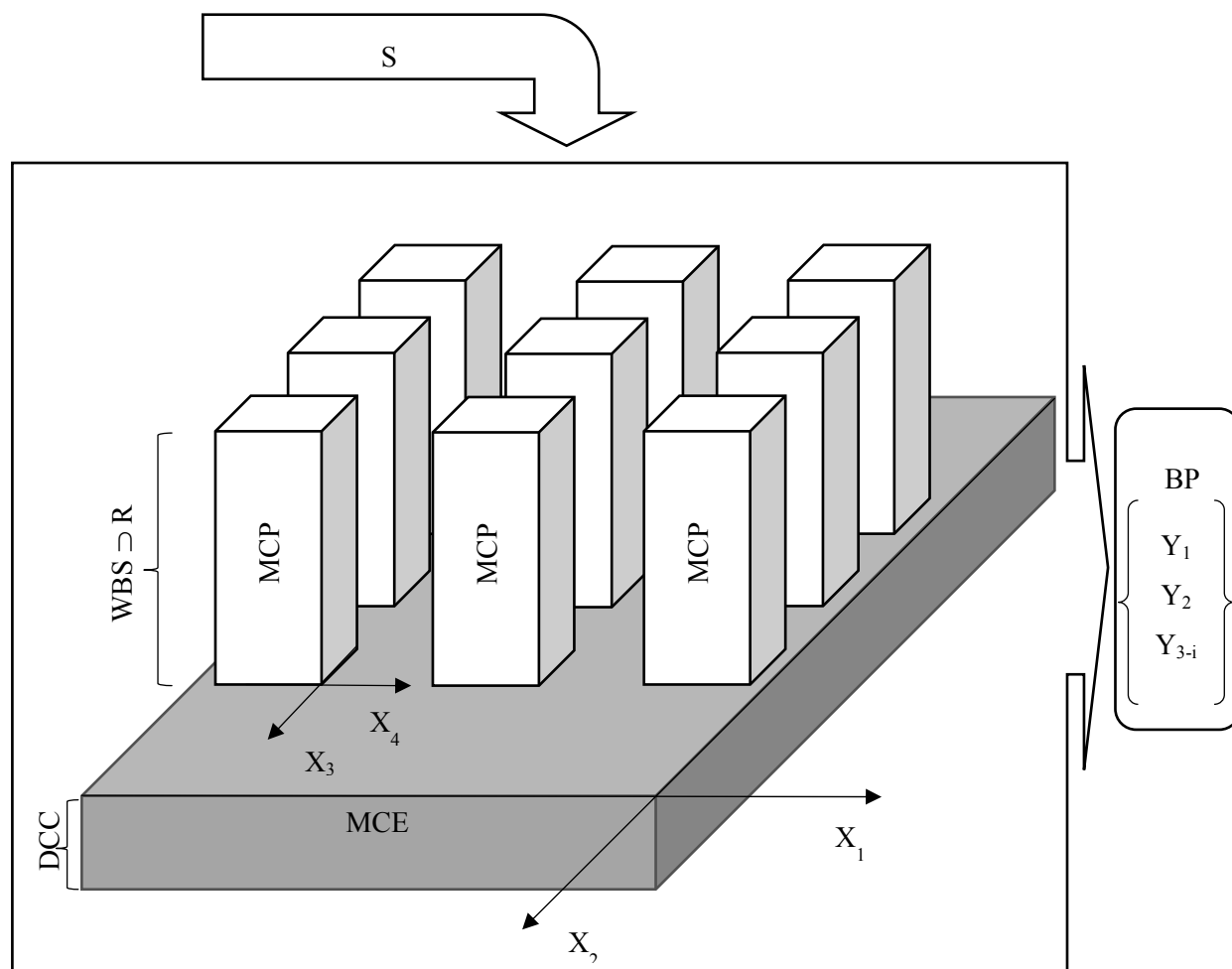


Fig. 4. Multidimensional organizational managerial model of the transport facilities construction company

Multidimensional structure shown in Fig. 4, allows to group projects performed by the organization, according to their scale (X_1) and territorial dispersion (X_2). This makes it possible to analyze the organizational and technological links between similar projects. There are different organizational and technological solutions at the specific projects: various membership of resources used (X_3), different industriality of applied solutions (X_4). The model shows that there is a connection between the structure of the organization (DCC) and its management methods (MCE), as well as between the structure (WBS) and management practices (MCP) of individual projects.

Let us note that the resources (R: labor, material, technical, intellectual, financial resources and technologies), used to create building product, can be ordered via the project work breakdown structure (WBS). As it can be seen from the figure, the multidimensional managerial model presents a

conversion tool of external resources provided by suppliers into construction products.

The novelty of this model is as follows:

- at first the contrast between the following factors as part of a multidimensional structure was described: the management structure and management methods of construction enterprises;
- at first multidimensional organizational managerial model of construction enterprise was created, showing:
 - the process of building product creating;
 - bilateral causal relationships between the management of the construction enterprise and management of individual construction projects, consisting of the organizational, technological and managerial impact of the organization at the construction project, and vice versa.

The basis of all the information about the operating activity of construction organization are the resources that are necessary to implement this activity. The structure of the resources used in the

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

creation of product of transport facilities construction enterprise, as well as information about the values of their costs in physical and monetary terms allow to create accurate computer model of operating activity (Fig. 5). Such model can be most

easily created using the software for project management. Variation of the most significant factors and study of selected indicators change will allow numerically optimizing the operating activity of the transport facilities construction enterprise.

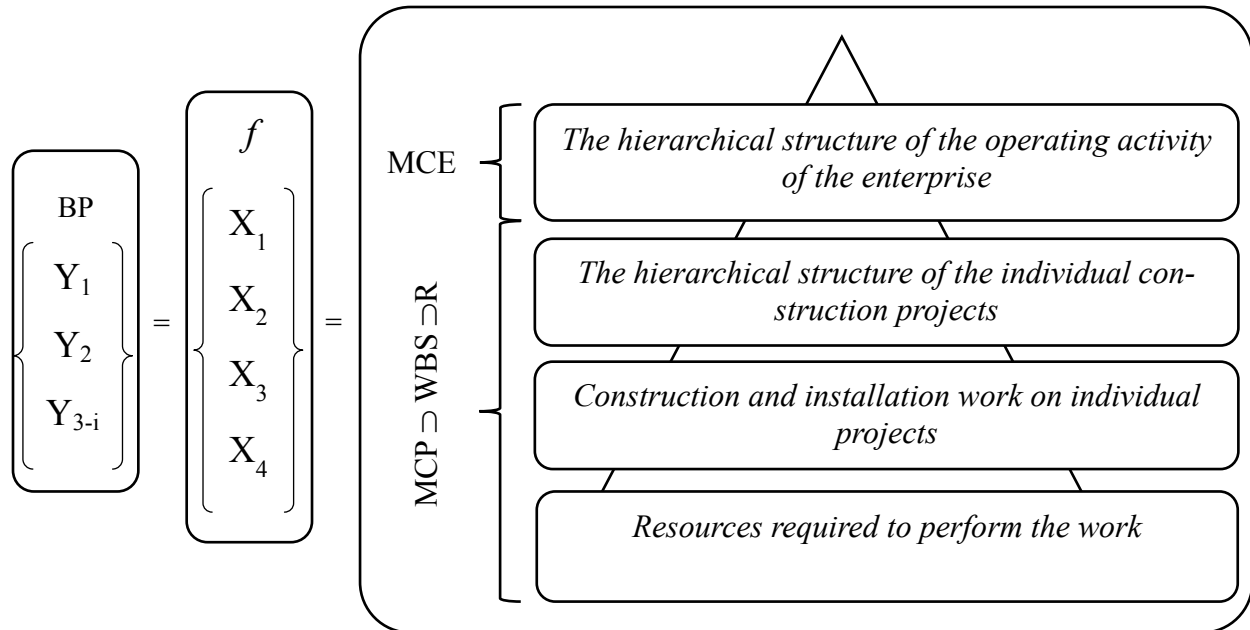


Fig. 5. Graphical analytical form of a computer model to optimize the operating activity of the transport facilities construction enterprise

Originality

Specific factors of the enterprise structure management and methods of the construction enterprise management are highlighted for the first time, their interaction is described.

Practical value

Optimization of organizational and technological solutions, made in the management of the enterprise as a whole and decisions of individual projects.

Conclusions

1. Development of three-stage scheme of operating activity modeling of the transport facilities construction enterprise has allowed to perform systematic review of this activity, to highlight the most important factors to establish the relationship between them and to optimize enterprises management techniques.
2. Analysis of the model of business processes interrelations of the company in question has allowed to identify factors of operating activity, to structure them and to distinguish the most

significant among them: average labor input of the totality of projects (X_1), average distance relocation (X_2), membership of resources used (X_3), industriality of applied solutions (X_4).

3. At first, it has been described on the example of the transport facilities construction company that the difference between management structure and management methods is in the variability of the first ones under the influence of constantly changing external factors.
4. Construction of a multidimensional organizational model of transport facilities construction enterprise has made it possible to substantiate the relationship of organizational and technological solutions, taken in the management of individual construction projects and the organization as a whole.
5. Development of a multidimensional organizational model has allowed firstly in its framework: to identify and to formalize the factors of management structure and management methods of construction enterprises; reflect the process of building production.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

6. The use of advanced software in the field of project management, the adopted structuring of the resources used for the building production, the proven multidimensionality of organizational and technological solutions has allowed developing a computer model of the operating activity of the transport facilities construction enterprise in the graphical-analytical form. This model can be the basis of numerical optimization of this activity.

REFERENCES

1. Бильченко, А. В. Мультиперспективные модели процесса эксплуатации мостовых сооружений [Текст] / А. В. Бильченко, А. Г. Кислов. // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2014. – Вип. 6. – С. 14–17.
2. Волчков, С. Бизнес-моделирование для совершенствования деятельности промышленного предприятия [Электронный ресурс] / С. Волчков, И. Балахонова. – Сайт компании «КомпьютерПресс», 2001. – Режим доступа: <http://compress.ru/article.aspx?id=12258>.
3. Доненко, В. І. Теоретико-методологічний комплекс забезпечення адаптивного розвитку будівельних організацій [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 05.23.08 / Доненко Василь Іванович. – Київ, 2011. – 40 с.
4. Калинина, Н. М. Моделирование деятельности предприятия в системе интегрированного контроллинга [Текст] / Н. М. Калинина. // Инновации. – 2006. – № 7. – С. 113–116.
5. Линник, Г. О. Шляхи удосконалення системи управління станом штучних споруд на залізницях України / Г. О. Линник, В. І. Соломка. // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 3. – С. 106–110.
6. Лобакова, Л. В. Організаційне моделювання реконструкції будівель при їх перепрофілюванні [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.23.08 / Лобакова Лілія В'ячеславівна. – Одеса, 2016. – 21 с.
7. Меньлюк, А. И. Оптимизация организационно-технологических решений реконструкции высотных инженерных сооружений [Текст] / А. И. Меньлюк, М. Н. Ершов, А. Л. Никифоров, И. А. Меньлюк. – Київ : ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2016. – 332 с.
8. Меньлюк, А. И. Разработка алгоритма численной оптимизации проектов строительства и реконструкции инженерных сооружений [Текст] / А. И. Меньлюк, А. Л. Никифоров, И. А. Меньлюк // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – № 8. – С. 72–79.
9. Меньлюк, О. І. Оптимізація організаційних, технологічних і фінансових рішень при реконструкції висотних інженерних споруд [Текст] / О. І. Меньлюк, О. Л. Нікіфоров, І. О. Меньлюк // Комунальне господарство міст. – 2016. – № 126. – С. 67–72.
10. Млодецький, В. Р. Організаційно-технологічна та управлінська надійність функціональної системи будівельної організації [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 05.23.08 / Млодецький Віктор Ростиславович. – Дніпропетровськ, 2005. – 40 с.
11. Мякишев, С. А. Многомерная структура управления строительной организацией [Текст] / С. А. Мякишев. // Актуальные направления научных исследований: от теории к практике (08.05.2016) : матер. VIII Междунар. науч.–практ. конф. – Чебоксары, 2016. – № 2. – С. 201–205.
12. Пшінько, О. М. Аналіз сучасних підходів до організаційно-технологічної надійності транспортних споруд [Текст] / О. М. Пшінько, А. В. Радкевич, І. В. М'якенька. // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 1. – С. 88–92.
13. Пшінько, О. М. Логістичні системи функціонування будівельного виробництва на основі підтримки єдності моделюючих умов [Текст] / О. М. Пшінько, І. Д. Павлов, І. А. Арутюнян. // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 1. – С. 82–87.
14. Типовые организационные структуры предприятий [Электронный ресурс] // Информационный портал «Cfin.ru», 1999. – Режим доступа: http://www.cfin.ru/management/iso9000/iso9000_orgchart.shtml.
15. Чернов, І. С. Вибір ефективних моделей зведення житлових будівель при фінансовій ситуації, що змінюється [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.23.08. / Чернов Ігор Станіславович. – Одеса, 2013. – 20 с.
16. Экономико-математические методы и прикладные модели [Текст] / В. В. Федосеев, А. Н. Гармаш, Д. М. Дайитбеков и др. – Москва : ЮНИТИ, 1999. – 391 с.
17. Nikiforov, A. L. Efficient reconstruction of engineering buildings in conditions of organizational constraints / A. L. Nikiforov, I. A. Menejlyuk, M. N. Ershov // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2016. – № 1. – С. 60–65.

А. МЕНЕЙЛЮК¹, А. НІКІФОРОВ^{2*}

¹ Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (048) 723 61 51, ел. пошта rg.mai@mail.ru, ORCID 0000-0002-1007-309X

^{2*} Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (066) 330 90 54, ел. пошта aleksey-nikiforov@mail.ua, ORCID 0000-0001-7002-7055

БАГАТОМІРНІСТЬ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ УПРАВЛІННІ ПІДПРИЄМСТВАМИ ІЗ БУДІВНИЦТВА ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

Мета. Обґрунтувати взаємозв'язок організаційно-технологічних рішень будівництва транспортних споруд при управлінні будівельним підприємством в цілому і окремими об'єктами будівництва і представити цю взаємозв'язок у вигляді багатовимірної організаційної структури. **Методика.** Синтез, аналіз, комбінаторно-морфологічний аналіз. **Результати.** Розроблено та проаналізовано модель бізнес-процесів і багатовимірну організаційну модель розглянутих підприємств. Обґрунтовано можливість розробки комп'ютерної моделі операційної діяльності даної організації. **Наукова новизна.** Вперше розглянуто специфічні фактори структури і методів управління будівельною організацією, проаналізовано їх взаємозв'язок. **Практична значимість.** Запропоновано методи оптимізації організаційно-технологічних рішень, що приймаються при управлінні будівельним підприємством в цілому і окремими об'єктами будівництва.

Ключові слова: зведення транспортних споруд; бізнес-процеси підприємства; багатовимірна організаційна структура; організаційно-технологічні рішення; чисельна оптимізація

А. МЕНЕЙЛЮК¹, А. НИКИФОРОВ^{2*}

¹ Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, ORCID 0000-0002-1007-309X

^{2*} Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (066) 330 90 54, эл. почта aleksey-nikiforov@mail.ua, ORCID 0000-0001-7002-7055

МНОГОМЕРНОСТЬ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ПО ВОЗВЕДЕНИЮ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Цель. Обосновать взаимосвязь организационно-технологических решений строительства транспортных сооружений при управлении строительным предприятием в целом и отдельными объектами строительства и представить эту взаимосвязь в виде многомерной организационной структуры. **Методика.** Синтез, анализ, комбинаторно-морфологический анализ. **Результаты.** Разработаны и проанализированы модель бизнес-процессов и многомерная организационная модель рассматриваемых предприятий. Обоснована возможность разработки компьютерной модели операционной деятельности рассматриваемой организации. **Научная новизна.** Впервые рассмотрены специфические факторы структуры и методов управления строительной организацией, проанализирована их взаимосвязь. **Практическая значимость.** Предложены методы оптимизации организационно-технологических решений, принимаемых при управлении строительным предприятием в целом и отдельными объектами строительства.

Ключевые слова: возведение транспортных сооружений; бизнес-процессы предприятия; многомерная организационная структура; организационно-технологические решения; численная оптимизация

REFERENCES

1. Bilchenko A. V., Kislov A. G. Multiperspektivnye modeli protsessa ekspluatatsii mostovykh sooruzheniy [Multiperspectivity model of bridges operation process]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2014, issue 6, pp. 14-17.
2. Volchkov S., Balakhonova I. *Biznes-modelirovanie dlya sovershenstvovaniya deyatel'nosti promyshlennogo predpriyatiya* (Business modeling for improving the activity of an industrial enterprise). Available at: <http://compress.ru/article.aspx?id=12258> (Accessed 18 December 2016).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

3. Donenko V. I. *Teoretyko-metodologichnyj kompleks zabezpechennja adaptivnogho rozvytku budivelnykh orghanizacij*. Avtoreferat Diss. [Theoretical and methodological set of adaptive provision of building organizations development. Author's abstract.]. Kyiv, 2011. 40 p.
4. Kalinina N. M. Modelirovanie deyatelnosti predpriyatiya v sisteme integrirovannogo kontrollinga [Enterprise modeling in the system of integrated controlling]. *Innovatsii – Innovations*, 2006, no. 7, pp. 113-116.
5. Lynnyk Gh. O., Solomka V. I. Shljakhy udoskonalennja systemy upravlinnja stanom shtuchnykh sporud na zaliznycjakh Ukrainy [Ways of improvement of control the system by the state of culture on the railways of Ukraine]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 3, pp. 106-110.
6. Lobakova L. V. *Orghanizacijne modeljuvannja rekonstrukciji budivelj pry jikh pereprofiljuvanni*. Avtoreferat Diss. [Organizational modeling of buildings reconstruction while their redevelopment. Author's abstract.]. Odessa, 2016. 21 p.
7. Menelyuk A. I., Yershov M. N., Nikiforov A. L., Menelyuk I. A. *Optimizatsiya organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy rekonstruktsii vysotnykh inzhenernykh sooruzheniy* [Optimization of organizational and technological solutions of reconstruction of high-rise engineering structures]. Kyiv : TOV NVP «Interservis» Publ., 2016. 332 p.
8. Menelyuk A. I., Nikiforov A. L., Menelyuk I. A. Razrabotka algoritma chislennoy optimizatsii proektov stroitelstva i rekonstruktsii inzhenernykh sooruzheniy [Development of algorithm for numerical optimization of construction and reconstruction projects of engineering structures]. *Visnyk Prydniprovskoji derzhavnoi akademiji budivnytva ta arkhitektury* [Bulletin of the Dnieper State Academy of Construction and Architecture], 2016, no. 8, pp. 72-79.
9. Menejljuk O. I., Nikiforov O. L., Menejljuk I. O. Optyimizacija orghanizacijnykh, tekhnologichnykh i finansovykh rishenij pry rekonstrukciji vysotnykh inzhenernykh sporud [Optimization of organizational, technological and financial solutions in the reconstruction of high-rise engineering structures]. *Komunaljne ghospodarstvo mist – Public utilities of cities*, 2016, no. 126, pp. 67-72.
10. Mlodeckij V. R. *Orghanizacijno-tekhnologichna ta upravlinsjka nadijnistj funkcionalnoji systemy budiveljnoji orghanizaciji*. Avtoreferat Diss. [Organizational, technological and managerial reliability of construction enterprise functional system. Author's abstract.]. Dnipropetrovsk, 2005. 40 p.
11. Myakishev, S. A. Mnogomernaya struktura upravleniya stroitelnoy organizatsiey [Multidimensional management structure of construction organization] : Tezisy VIII Mezhdunar. nauch.–prakt. konf. “Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy: ot teorii k praktike (08.05.2016)” [Proc. of the VIII Int. Scientific and Practical Conf. “Current lines of research: from theory to practice”]. Cheboksary, 2016, pp. 201–205.
12. Pshinjko O. M., Radkevych A. V., M'jakenjka I. V. Analiz suchasnykh pidkhodiv do orghanizacijno-tekhnologichnoji nadijnosti transportnykh sporud [Analysis of current approaches to organizational and technological reliability of transport facilities]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 1, pp. 88-92.
13. Pshinjko O. M., Pavlov I. D., Arutjunjan I. A. Loghistychni systemy funkcionuvannja budiveljnogho vyrobnytva na osnovi pidtrymky jednosti modeljujuchykh umov [Logistic systems of functioning of building production based on support unity of modeling conditions]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 1, pp. 82-87.
14. Tipovye organizatsionnye struktury predpriyatij [Typical organizational structures of enterprises]. Sfin.ru. Available at: http://www.cfin.ru/management/iso9000/iso9000_orgchart.shtml
15. Chernov I. S. *Vybir efektyvnykh modelej zvedennja zhytlovykh budivelj pry finansovoji sytuaciji, shho zminjujetsja*. Avtoreferat Diss. [Choice of effective models of construction of residential buildings at the situation of financial changes. Author's abstract.]. Odessa, 2013. 20 p.
16. Fedoseev V. V., Garmash A. N., Dayitbegov D. M. *Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli* [Economic and mathematical methods and applied models] (1st ed.). Moscow, JuNITI Publ., 1999. 391 p.
17. Nikiforov A., Menejljuk I., & Ershov M. Efficient reconstruction of engineering buildings in conditions of organizational constraints. *Avtomatizacija tehnologichnih i biznes-procesiv – Automation of technological and business processes*, 2016, no. 1, pp. 60-65.

Prof. V. A. Halushko, D. Sc. (Technical, Ukraine) and Prof. A. V. Radkevich, D. Sc. (Technical, Ukraine) recommended this article to be published.

Received: Nov. 21, 2016.

Accepted: Dec. 26, 2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 621.643.078.5:699.841

А. В. МУРАШКО¹, В. С. ДОРОФЕЕВ^{2*}

¹ Кафедра «Железобетонные и каменные конструкции», Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (063) 997 76 83, эл. почта alexeymurasko@gmail.com, ORCID 0000-0002-2812-5951

^{2*} Кафедра «Железобетонные и каменные конструкции», Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (048) 729 86 20, эл. почта dorvs@ukr.net

РЕГУЛЯРНОСТЬ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ПРИ ОЦЕНКЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ОПОР ТРУБОПРОВОДОВ

Цель. Предложить рекомендации для визуальной оценки подобных конструкций исходя из анализа существующих отдельно стоящих опор под технологические трубопроводы реального объекта и их усиления путем обеспечения регулярности. **Методика.** Сочетание численных методов расчета (метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе Lira) и метода экспертных оценок. Оценка и обеспечение сейсмостойкости существующих отдельно стоящих опор технологических трубопроводов. **Результаты.** Получены схемы усиления конструкций, обеспечивающие требования обеих групп предельных состояний, результаты обобщены с целью дальнейшей визуальной оценки сейсмостойкости подобных конструкций на основании наличия и количества связевых элементов. Предложенный способ усиления является уместным вне зависимости от конфигурации температурных блоков трубопроводов. **Научная новизна.** Предложенный в результате работы подход к визуальной оценке сейсмостойкости опор технологических трубопроводов является первым шагом в реализации разрабатываемой Системы оценки фактической сейсмостойкости зданий и сооружений, которая на настоящий момент разрабатывается для железобетонных каркасных зданий. **Практическая значимость.** Конструктивные решения по усилению опор обеспечением регулярности отдельных температурных блоков, принятые на основании описанных в работе результатов реализуются на рассматриваемом объекте

Ключевые слова: система оценки фактической сейсмостойкости; опоры технологических трубопроводов; регулярность конструктивной схемы; визуальная оценка

Введение

На сегодняшний день в области оценки сейсмостойкости остро стоит вопрос дефицита нормативных документов в области, как паспортизации, так и расчета специальных сооружений типа отдельно стоящих опор и эстакад под технологические трубопроводы. А та нормативная база, которая существует до сих пор, предлагает рассматривать систему опор, как отдельно стоящие опоры [1]. Таким образом, полностью нивелируется пространственная работа конструкций. А именно пространственная работа описывает реальное поведение таких конструкций при сейсмических воздействиях.

Цель

В сложившейся ситуации в нормативной базе все более важным становится вопрос массо-

вой оценки фактической сейсмостойкости существующих зданий и сооружений. На сегодняшний день ведется активная работа по созданию системы оценки фактической сейсмостойкости (СОФС). Детально она представлена в [2, 3]. Основные положения данной системы кратко изложены ниже.

Методика

Система является трехуровневой и охватывает методы оценки сейсмостойкости от визуальной оценки, до нелинейного анализа в сочетании с методами инженерной сейсмометрии.

Оценка фактической сейсмостойкости 1-го уровня (ОФС-1). Для оценки сейсмического риска территорий и разработки плановых мероприятий по повышению сейсмостойкости для обеспечения необходимого уровня надежности, а также разработки комплекса мероприятий по

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ликвидации последствий землетрясений в мировом опыте применяются методики в виде формы, составляемой на основании результатов визуального обследования. На данном уровне о здании собирается минимальный объем информации, который включает в себя оценку геометрической формы, этажности, выступающих частей, и остальных элементов существенно влияющих на сейсмостойкость. На этом этапе также анализируются дефекты, обусловленные техническим состоянием. Исходя из этого минимального объема информации, экспертом делается вывод о сейсмостойкости объекта. Если на этом этапе сейсмостойкость объекта является недостаточной, то необходимо уточнить сейсмостойкость с позиций второго уровня.

Оценка фактической сейсмостойкости 2-го уровня (ОФС-2) представляет собой формализованный подход к оценке сейсмостойкости в форме паспортизации, вибродиагностики и линейных методов расчета, для объектов массового строительства. Этот этап обязателен для объектов, которые не соответствуют требованиям нормативных документов. На основании результатов полученных на этом этапе дается заключение с рекомендациями о необходимом уровне конструктивных мероприятий по обеспечению сейсмостойкости. Для особо ответственных объектов, которые относятся к классу последствий ССЗ необходим дополнительный объем информации, который может быть получен при помощи третьего уровня системы.

Оценка фактической сейсмостойкости 3-го уровня (ОФС-3). Для объектов экспериментального строительства, особо ответственных и уникальных объектов, необходимо не только проведение инженерно-сейсмометрических испытаний, но также и расчетная проверка работы конструкций здания при помощи численного моделирования нелинейной работы конструкций здания при сейсмическом воздействии, которое описывает его при помощи акселерограмм, записанных на площадке строительства. Исходя из описанного сочетания экспериментально-расчетных операций, можно сделать заключение о том, какова фактическая сейсмостойкость конкретного объекта с учетом реальных характеристик конструкций и воздействия, которое было записано на площадке, где находится объект. На данном этапе для анализа рассматривается максимально-доступный объем информации об объекте.

В настоящее время описанная выше система разрабатывается применительно к железобетонным каркасным зданиям.

В работе затрагивается вопрос оценки фактической сейсмостойкости существующих стальных порталных и эстакадных опор под технологические трубопроводы

Оценке фактической сейсмостойкости уделяет внимание целый ряд исследователей в том числе и Украинских. Стоит отметить работы [4, 5]. В перечисленных работах внимание уделено вопросам паспортизации и визуально-инструментальным методам оценки.

Данное исследование носит по большей мере прикладной характер. И кроме решения частной задачи оценки текущего состояния и усиления существующих конструкций опор технологических трубопроводов, предпринимается шаг к визуальной оценке сейсмостойкости таких и подобных конструкций на основании анализа наличия и количества связевых элементов.

Предметом исследования выступили опоры под технологические трубопроводы. Протяженность секций от 30 до 47 м, высота от 7,7 м до 10,6 м. Конструкции выполнены из широкополочных двутавров. Класс последствий – ССЗ. Ветровой район – 3. Сейсмичность 8 баллов.

Данные конструкции эксплуатируются уже около 50 лет, за это время существенные изменения претерпела нормативная база. Также ситуация была усложнена еще тремя дополнительными аспектами:

- изначально при производстве работ по возведению конструкций опор не были выполнены в натуре все связевые элементы предусмотренные проектом;
- усиление необходимо было производить таким образом, чтобы минимизировать остановки технологического процесса;
- каждая секция обладала дополнительными нерегулярностями: первая и вторая в плане, вторая и третья – по высоте.

Результаты

На рис. 1 приведены результаты расчета опор трубопроводов по первой группе предельных состояний на момент обследования. При расчете по второй группе предельных состояний состояние еще более плачевное.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

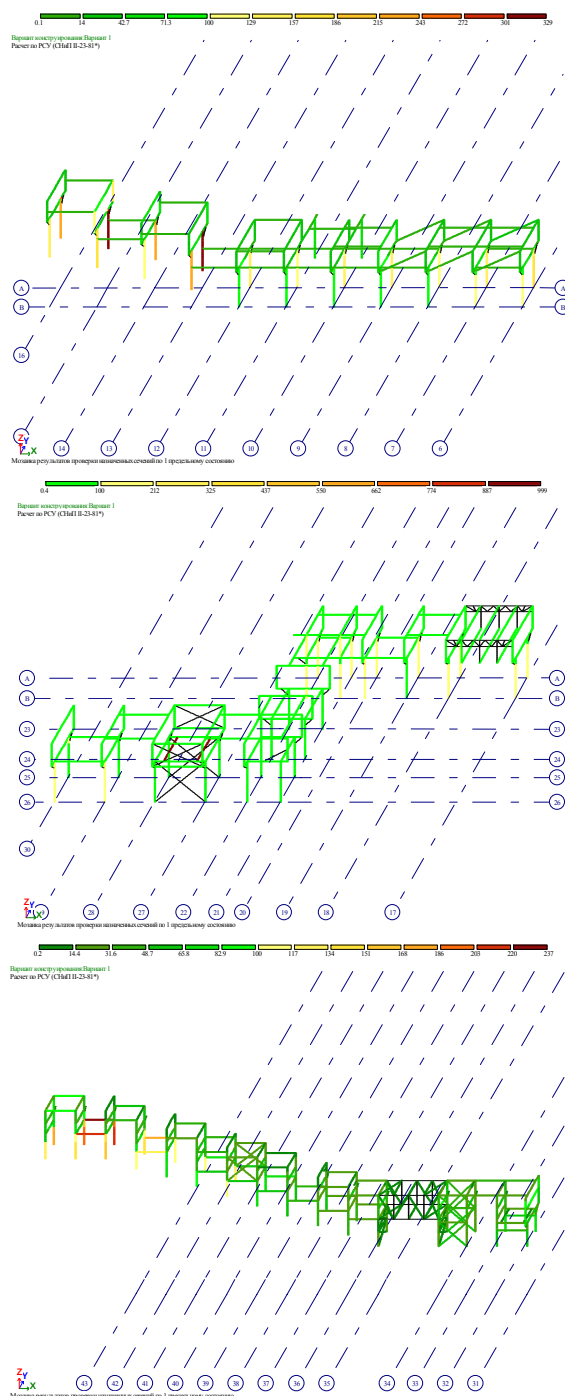


Рис. 1. Исходная ситуация

Из рисунка видно, что сечения обладают дефицитом несущей способности, как вертикальные, так и горизонтальные несущие элементы.

Стоит отметить, что одним из ключевых требований нормативных документов относительно сейсмостойкости – регулярность. И относится оно как к зданиям или сооружениям в целом, так и к отдельным конструктивным эле-

ментам. Поэтому для обеспечения регулярности рассматриваемых систем было принято решение усиления путем изменение расчетной схемы путем введения в расчет дополнительных связей. Связи были выполнены либо в виде одиночных, либо двух швеллеров, образующих короб. В ряде случаев было принято решение об удалении некоторых существующих связевых элементов.

Усиление на примере секции 1 приведено на рис 2.

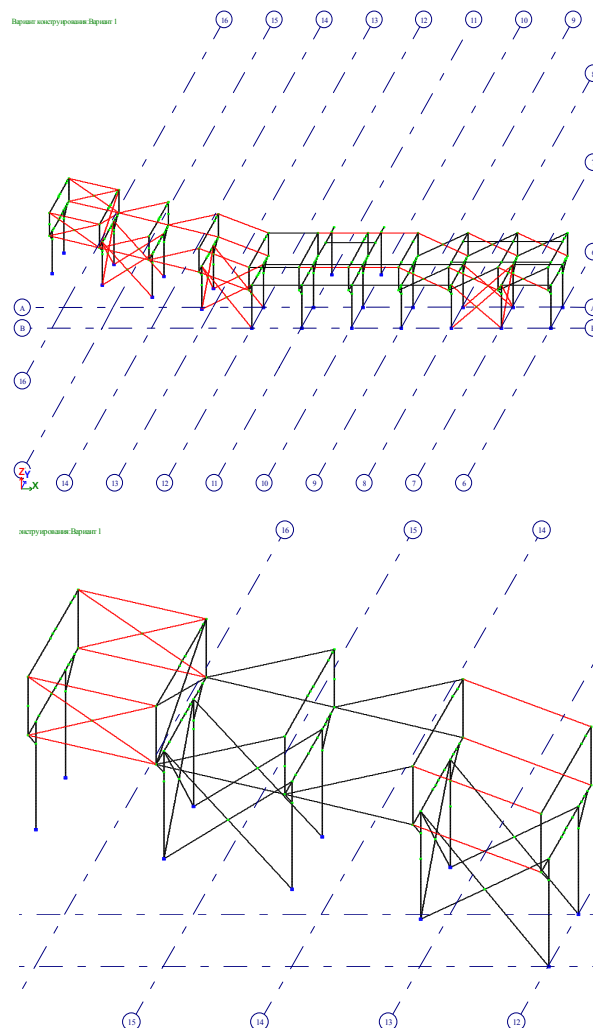


Рис. 2. Фрагменты усиления секции 1.
Дополнительные связи, введенные в расчетную схему
(короб из швеллеров 80×50×4 и 140×60×5)

Усиление производилось для каждого температурного блока. Для всех трех блоков было выполнено несколько вариантов расчета, в качестве оптимального с точки зрения минимального количества связевых элементов было принято решение о создании ядер жесткости – свя-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

зевых блоков (по аналогии со зданиями) и введении дополнительных отдельных связей в местах возникновения максимальных внутренних усилий.

В результате подбора варианта расстановки связевых элементов были получены следующие решения, для каждой из рассматриваемых схем (рис. 3).

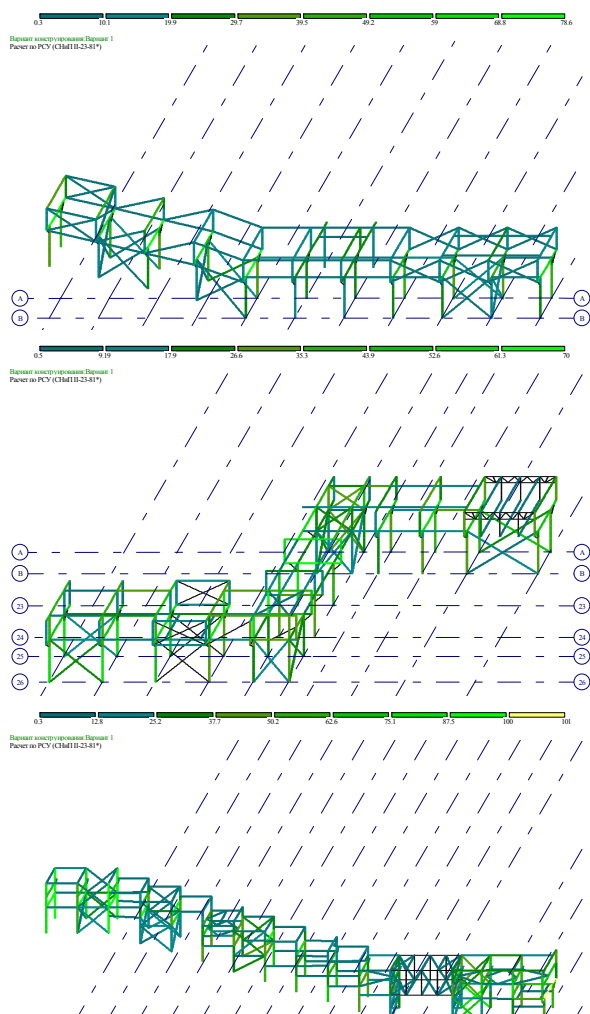


Рис. 3. Результаты расчета по первой группе предельных состояний с учетом выполненного усиления

Выводы

Исходя из выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная схема усиления отдельно стоящих трубопроводов позволяет удовлетворить требования по первой и второй группам

предельных состояний, при рассмотрении каждого температурного блока, как единой пространственной конструктивной схемы.

2. Из полученных результатов видно, что предварительное заключение о дефиците сейсмостойкости для опор трубопроводов, эксплуатирующихся в аналогичных условиях может быть сделано на основании визуального анализа наличия и расположения связевых элементов.

3. При отсутствии связевых блоков, регулярно расположенных связей сейсмостойкость объекта можно считать недостаточной и рекомендуется выполнение второго уровня оценки фактической сейсмостойкости – паспортизация, в рамках которой необходимо выполнение вибродинамических исследований в сочетании с расчетами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пособие по проектированию отдельно стоящих опор и эстакад под технологические трубопроводы к СНиП 2.09.03-85 [Текст]. – Москва : Стройиздат, 1989.
2. Murashko, O. A New Approach To The Dynamic Certification In Ukraine [Text] / O. Murashko, O. Adamov // Proceedings of the 5th International Conference of Young Scientists GEODESY, ARCHITECTURE & CONSTRUCTION, November 21–23, 2013. – Lviv : Ukraine. – pp. 112-113.
3. Dorofeev, V. A new approach to buildings seismic resistance assessment in Ukraine [Text] / V. Dorofeev, K. Yegupov, A. Murashko, O. Adamov // Proceedings of the 2-nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, August 24-29, 2014. – Istanbul : Turkey. – pp. 138-143.
4. Кулябко, В. В. Проблемы и перспективы теории и практики исследования динамики конструкций сооружений с подвижными нагрузками [Текст] / В. В. Кулябко, А. В. Масловский, А. В. Макаров // Дороги і мости. – Київ : ДерждорНДІ, 2007. – Вип. 7, т. 1. – С. 344-348.
5. Kulyabko, V. Structure dynamics: calculations, designing, diagnostic tests and nonlinear damping [Text] / V. Kulyabko, A. Macarow, O. Nechytailo // Harvard Journal of Fundamental and Applied Studies. – Harvard University Press, 2015. – № 1(7). – pp. 520-530.

О. В. МУРАШКО¹, В. С. ДОРОФЄЄВ^{2*}

¹ Кафедра «Залізобетонні та кам'яні конструкції», Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (063) 997 76 83, ел. пошта alexeymurasko@gmail.com, ORCID 0000-0002-2812-5951

^{2*} Кафедра «Залізобетонні та кам'яні конструкції», Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (048) 729 86 20, ел. пошта dorvs@ukr.net

РЕГУЛЯРНІСТЬ КОНСТРУКТИВНОЇ СХЕМИ ПРИ ОЦІНЦІ СЕЙСМОСТІЙКОСТІ ОПОР ТРУБОПРОВОДІВ

Мета. Запропонувати рекомендації для візуальної оцінки подібних конструкцій виходячи з аналізу існуючих окремо розташованих опор під технологічні трубопроводи реального об'єкта і їх посилення шляхом забезпечення регулярності. **Методика дослідження.** Поєднання численних методів розрахунку (метод скінчених елементів, реалізований в програмному комплексі Lira) і методу експертних оцінок. Оцінка і забезпечення сейсмостійкості існуючих окремо розташованих опор технологічних трубопроводів. **Результати.** Отримано схеми підсилення конструкцій, що забезпечують вимоги обох груп граничних станів, результати узагальнені з метою подальшої візуальної оцінки сейсмостійкості подібних конструкцій на підставі наявності та кількості в'язевих елементів. Запропонований спосіб посилення є доречним незалежно від конфігурації температурних блоків трубопроводів. **Наукова новизна.** Запропонований в результаті роботи підхід до візуальної оцінки сейсмостійкості опор технологічних трубопроводів є першим кроком в реалізації розроблюваної системи оцінки фактичної сейсмостійкості будівель і споруд, яка на даний момент розробляється для залізобетонних каркасних будинків. **Практична значимість.** Конструктивні рішення щодо посилення опор забезпеченням регулярності окремих температурних блоків, прийняті на підставі описаних в роботі результатів реалізуються на даному об'єкті

Ключові слова: система оцінки фактичної сейсмостійкості, опори технологічних трубопроводів, регулярність конструктивної схеми, візуальна оцінка

О. V. MURASHKO¹, V. S. DOROFYEV^{2*}

¹ Dep. «Reinforced concrete and stone structures», Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (063) 997 76 83, e-mail alexeymurasko @ gmail.com, ORCID 0000-0002-2812-5951

^{2*} Dep. «Reinforced concrete and stone structures», Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (048) 729 86 20, e-mail dorvs@ukr.net

REGULARITY OF PIPELINE PILLARS DESIGN SCHEMES DURING THE SEISMIC RESISTANCE ASSESSMENT

Purpose. To submit recommendations to the visual evaluation of such type of structures on the basis of an analysis of existing freestanding pillars for technological pipe lines of the real objects and their strengthening by ensuring regularity. **Methodology.** The combination of numerical calculation methods (finite element method, implemented in the software complex Lira) and the method of expert estimations. Seismic resistance estimation and maintenance of existing freestanding pillars of technological pipelines. **Findings.** Obtained strengthening circuit designs that provide the requirements of both groups of limit states, the results are summarized in order to further visualize assessment of seismic stability of such structures on the basis of the presence and amount of bond elements. The proposed method of strengthening is relevant is the temperature dependence of the configuration of pipelines blocks. **Originality.** The approach proposed as a result of the visual evaluation of seismic stability of pillars for technological pipelines is the first step in the implementation of the developed evaluation systems of actual seismic resistance of buildings and structures, which is currently being developed for the reinforced concrete frame buildings. **Practical value.** Constructive solutions to strengthen pillars to ensure regularity of individual thermal units made on the basis described in the work of the results are realized

Keywords: system for assessing the actual seismic stability, technological piping supports, the regularity of structural layout, visual assessment

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

REFERENCES

1. *Posobie po proektirovaniyu otdelno stoyachikh opor i estakad pod tekhnologicheskie truboprovody k SNiP 2.09.03-85* [Manual for the design separately standing towers and platforms for technological pipe lines to the SNiP 2.09.03-85]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989.
2. Murashko O., Adamov O. *A New Approach To The Dynamic Certification In Ukraine*. Proceedings of the 5th International Conference of Young Scientists GEODESY, ARCHITECTURE & CONSTRUCTION, November 21–23, 2013. Lviv, Ukraine, pp. 112-113.
3. Dorofeev V., Yegupov K., Murashko A., Adamov O. *A new approach to buildings seismic resistance assessment in Ukraine*. Proceedings of the 2-nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, August 24-29, 2014. Istanbul, Turkey, pp. 138-143.
4. Kulyabko V. V., Maslovskiy A. V., Makarov A. V. Problemy i perspektivy teorii i praktiki issledovaniya dinamiki konstruktsiy sooruzheniy s podvizhnymi zagruzkami [Problems and perspectives of theory and practice of structural dynamics research facilities with mobile downloads]. *Doroghy i mosty – Road and bridge*, 2007, issue 7, vol. 1, pp. 344-348.
5. Kulyabko V., Macarow A., Nechytailo O. *Structure dynamics: calculations, designing, diagnostic tests and nonlinear damping*. Harvard Journal of Fundamental and Applied Studies. Harvard University Press, 2015. no 1(7), pp. 520-530.

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. К. В. Езуповым (Україна), д.т.н., доц. А. Л. Тютькиным (Україна).

Поступила в редколлегию 28.10.2016.

Принята к печати 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.042:625.745-029:33

П. М. САЛАМАХИН*

* Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский пр., 64, Москва, Россия, 125319, тел. +00 8 915 213 08 96, эл. почта pavel-salamahin@mail.ru

К ВОПРОСУ ЭКОНОМИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ И ДЕНЕЖНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ ВСЕГО МИРА

В статье приведена критика действующих в странах западной Европы, в США, Канаде, РФ, Украине, Белоруссии и Казахстане нормативных временных вертикальных нагрузок для проектирования автодорожных мостовых сооружений и обоснована необходимость их замены соображениями экономии материальных и денежных ресурсов.

Ключевые слова: мостовые сооружения; нормативные загрузки; схемы нагружения; линии влияния; вертикальные нагрузки

Введение

Проанализировав вид действующих временных нормативных вертикальных нагрузок на автодорожные мостовые сооружения России, Украины, Белоруссии, Казахстана и значительной части зарубежного западного мира, легко прийти к выводу, что проектировщики автодорожных мостов и руководители дорожных хозяйств этих государств, пользуясь ими без их критической оценки, способствуют нанесению вреда экономике своих стран.

Чтобы доказать это, заметим вначале, что по автомобильным дорогам и автодорожным мостовым сооружениям всего современного мира при высокой на них интенсивности движения транспортных средств движутся бесконечные сложные по составу колонны автомобилей или автопоездов, а при низкой интенсивности — движутся разнообразные одиночные виды автомобилей или техники. Все они создают переменное во времени напряженное состояние в элементах мостовых сооружений и в одежде автомобильных дорог.

При этом при высокой интенсивности движения наибольшее напряженное состояние в элементах мостовых сооружений создается тем легко определяемым участком проходящей колонны с известным или прогнозируемым составом транспортных средств, который создает на них наибольшую погонную нагрузку, а дорож-

ная одежда получает наибольшее воздействие от наиболее нагруженной тележки или оси транспортного средства того же участка колонны. Такие участки колонн транспортных средств логично принимать в качестве моделей нормативных вертикальных временных нагрузок для проектирования мостовых сооружений и дорожных одежд на автомобильных дорогах с высокой интенсивностью движения.

При низкой интенсивности движения на дорогах наибольшее напряженное состояние в элементах мостовых сооружений создается теми легко определяемыми проходящими или прогнозируемыми одиночными автомобилями, которые создают на них наибольшую погонную нагрузку, а дорожная одежда получает наибольшее воздействие от наиболее нагруженной тележки или оси того же автомобиля.

Такие одиночные автомобили логично принимать в качестве модели нормативного автомобиля для проектирования мостовых сооружений и дорожных одежд на автомобильных дорогах с низкой интенсивностью движения.

Но уже многие десятилетия в большинстве стран мира при проектировании автодорожных мостовых сооружений в качестве нормативной вертикальной нагрузки от автотранспортных средств вместо реальных или условных колонн транспортных средств или одиночно проходящих автомобилей по соображениям облегчения

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

нагружения линий и поверхностей влияния силовых и деформационных факторов в элементах мостовых сооружений применяют условные нагрузки в виде комбинации равномерно распределенной нагрузки с несколькими сосредоточенными грузами.

На рис. 1, 2 и 3 по нормам западной Европы [1], США [2] и РФ [3] приведены их продольные схемы на первой полосе движения.



Рис. 1. Продольная схема нормативной западноевропейской нагрузки LM1 (EUROCODE 1 EN 1991-2:2003: The European standards for structures, 2003)

Западноевропейской нагрузкой LM1 для 1-ой полосы движения установлены: $Q_{ik} = 300$ кН; $q_{ik} = 9$ кН/м².

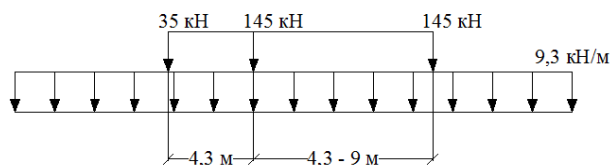


Рис. 2. Продольная схема нормативной нагрузки HL93 по нормам США (22TCN-272-05 и AASHTO – 1998)

Нагрузкой HL93 США для первой полосы установлены равномерно распределенная нагрузка 9,3 кН/м и три осевых нагрузки: 35, 145 и 145 кН.

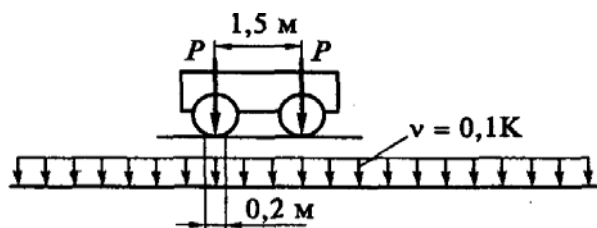


Рис. 3. Продольная схема нормативной нагрузки АК по нормам РФ (ГОСТ Р 52748-2007)

Нагрузкой АК РФ при $K=14$, установлены равномерно распределенная нагрузка 14 кН/м и двухосная тележка с нагрузками на оси по 140 кН.

При их сравнении легко устанавливается общая для них особенность: они состоят из комбинации равномерно распределенных нагрузок с тележками из двух или трех осей.

При этом численное значение интенсивности равномерно распределенной нагрузки и нагрузок на оси тележек установлены постоянными.

Основная часть

Каждый из мостовиков, кто владеет элементарными знаниями из строительной механики и обеспокоен необходимостью создания мостовых сооружений, надежно противодействующих реально возможным транспортным средствам при минимальных затратах конструкционных материалов, вправе предполагать, что предложенные нормативные нагрузки являются очевидным аналогом какой-то реальной максимально возможной нагрузки.

Но приведенные выше условные нагрузки по своему виду не имеют ничего общего с реальными колоннами транспортных средств или отдельными автомобилями.

Их можно рассматривать лишь в качестве своеобразных эквивалентных комбинированных нагрузок, состоящих из равномерно распределенной нагрузки и произвольного количества осей тележек с установленными для них сосредоточенными грузами.

Но параметры таких эквивалентных комбинированных нагрузок от любых реальных колонн транспортных средств и от одиночно проходящего автомобиля не могут быть постоянными, они существенно зависят от состава колонны транспортных средств, от вида отдельного автомобиля, от длины и формы линий влияния усилий в элементах мостовых сооружений.

Убедимся в этом на примере комбинированных российской и украинской нагрузок АК. Класс К этих условных комбинированных эквивалентных нагрузок, а точнее класс усилий, в единицах А1 от любой реальной нагрузки строго определяется по следующей формуле

$$K = \frac{\sum P_i y_i}{(N_{1p} + N_{1q})}, \quad (1)$$

де $\sum P_i y_i$ – усилие в элементе сооружения от любой реальной нагрузки; $(N_{1p} + N_{1q})$ – усилие в том же элементе сооружения от элементов единичной нагрузки А1.

Этот класс существенно зависит от состава колонны реальных транспортных средств, дли-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ны и формы линий влияния силовых факторов и может изменяться в пределах от 6 до 20, но принят в России равным 14, а в нормах Украины равным 15.

Получим этот класс, например, для перспективной нормативной автомобильной нагрузки Н-48 в виде одной колонны из 22 автопоездов четырех типов (табл. 1) с массами от 35 до 48 т

для главной полосы движения по мостовым сооружениям на дорогах, по которым с учетом перспективы их эксплуатации предполагается движение автопоездов с массой до 48 т. Состав колонны принят по схеме 2Г+3В+3Б+6А+3Б+3В+2Г с дистанцией 20 м между транспортными средствами по статистическим данным для одного из городов России.

Таблица 1

Данные о нагрузках по осям автопоездов и расстояниях между их осями для Н-48

Тип а.п.	Общая масса автоп., т	Нагрузка на ось 1, т	Расстояние между осями 1-2, м	Нагрузка на ось 2, т	Расстояние между осями 2-3, м	Нагрузка на ось 3, т	Расстояние между осями 3-4, м	Нагрузка на ось 4, т
А	48	12,00	1,65	12,00	2,05	12	1,40	12
Б	44	11,00	2,01	11,00	1,80	11	1,80	11
В	40	8,00	1,50	8,00	2,70	12	1,40	12
Г	35	7,50	1,79	7,50	2,51	10	1,40	10

На рис. 4 приведены графики классов нагрузки (усилий) в единицах А1 от нагрузки Н-48, принятой в качестве перспективной нормативной нагрузки при дистанциях 20 м между транспортными средствами для двух форм треугольных линий влияния (с вершиной в середине и в начале) в диапазоне длин линий влияния от 3 до 207 м.

Из рассмотрения этого графика следует, что в рассмотренном диапазоне длин линий влияния силовых факторов для треугольных линий влияния с вершиной в их середине класс нагрузки (усилий) в единицах А1 от колонны Н-48 не постоянен, он изменяется в пределах от 10,5 до 16, а для треугольных линий влияния с вершиной в их начале – в пределах от 11 до 16,5.

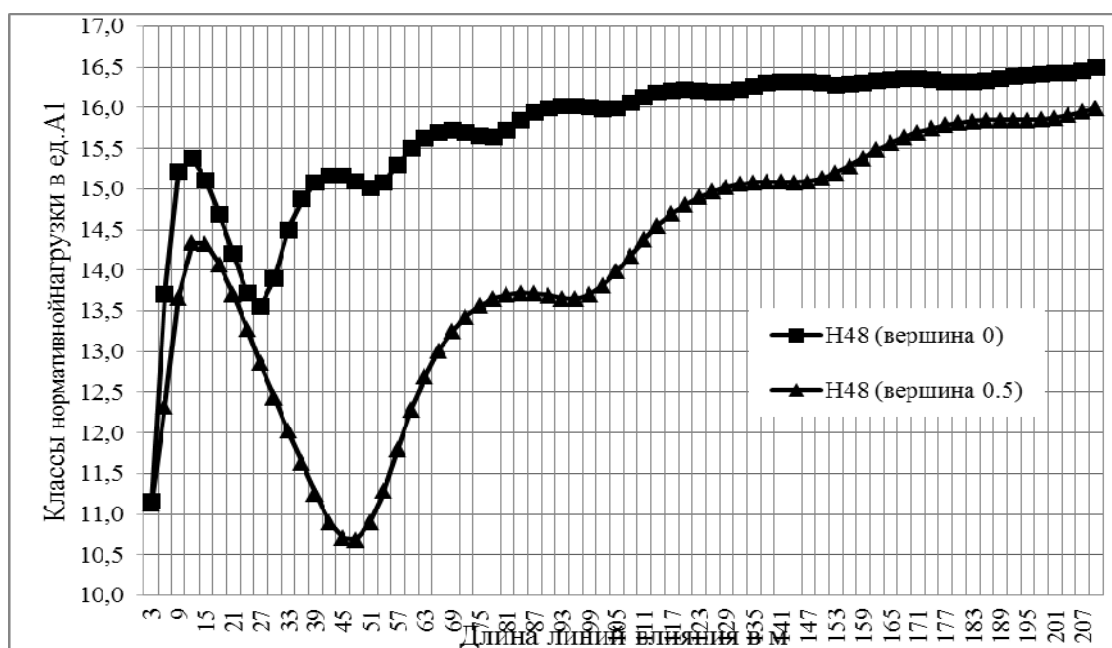


Рис. 4. Класс нагрузки(усилий) в единицах А1 от перспективной нормативной нагрузки Н-48 при дистанциях 20 м между транспортными средствами

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Из его рассмотрения следует также, что в области длин линий влияния от 21 м до 105 м нормативная нагрузка А14 является избыточной по сравнению даже с весьма интенсивной нагрузкой Н-48 для элементов мостов, линии влияния силовых факторов для которых имеют вершину в середине и являются недостаточной при длинах линий влияния более 105 м для тех же элементов, а для элементов мостов, линии влияния силовых факторов которых имеют вершину вначале является недостаточной во всем рассмотренном диапазоне длин линий влияния за исключением длин линий влияния 3, 21 и 27, для которых она приемлема.

При сопоставлении класса 14 условной действующей нормативной нагрузки АК с классом К от реально возможной нагрузки легко выявляется, что на участках длин линий влияния, где класс в единицах А1 условной нормативной нагрузки АК больше класса от реально возможной колонны транспортных средств, мостовые сооружения проектируются на избыточную нагрузку, что вызывает избыточные расходы материалов, а на остальном её участке на недостаточные нагрузки, что может привести к разрушению моста. Их использование может привести не только к значительным экономическим потерям, но и к авариям мостов и гибели людей.

Дополнительно отмечу, что при этом;

- проектирование пролетных строений с различными пролетами производится на различные и неизвестные проектировщикам и эксплуатационникам реальные нагрузки;

- проектирование разных элементов одного и того же мостового сооружения с принятым пролетом выполняется на различные и неизвестные проектировщикам и эксплуатационникам реальные нагрузки;

- пролетные строения разных пролетов и их элементы в итоге имеют разную и неизвестную проектировщикам и эксплуатационникам степень обеспеченности несущей способности на воздействие реально проходящих транспортных средств;

- в области пролетов от 6 до 42 м действующая нормативная нагрузка А14, не имеющая

очевидной связи с реально действующими нагрузками совместно с одиночной тяжеловесной нагрузкой Н14, не имеющей аналогов по расстоянию 1,2 м между ее осями и нагрузке на оси по 25 т при двух колесах между осями при физически необоснованных для них динамических коэффициентов и коэффициентов надежности по нагрузке создают расчетные силовые факторы, превышающие их значения от реально возможных наиболее тяжелых транспортных средств более чем в 1,5...2 раза, что неоправданно увеличивает расходы на материалы пролетных строений на 30...35 % на автомобильных дорогах всех категорий.

Приведенные выше выводы применительно к нормативной нагрузке АК в равной мере относятся и к западноевропейским нагрузкам LM1 и к нормативным нагрузкам США, Украины, Белоруссии и Казахстана поскольку параметры их комбинированных нормативных нагрузок установлены тоже вне связи с длиной и формой линий влияния силовых факторов.

На международных конференциях и семинарах, посвященных вопросам проектирования мостовых сооружений на автомобильных дорогах, мною многократно было замечено, что западные коллеги-мостовики не могли ответить на простой мой вопрос: «Какова грузоподъемность моста с пролетом 42 м, спроектированного Вами на нагрузку LM1?», а на вопрос: «Почему равномерно распределенная нагрузка в LM1 установлена вне связи с длиной и формой линий влияния?» уважаемый французский инженер-мостовик ответил: «У нас не принято задавать такие вопросы!». Это свидетельствует о том, что мостовики многих стран мира, пользуясь своими нормами при проектировании мостовых сооружений без их критической оценки, способствуют нанесению вреда экономике своих стран.

Первые основные результаты моих работ этого направления были приведены в монографии [4].

Рекомендации, содержащиеся в ней, к настоящему времени учтены только в нормах проектирования мостовых сооружений КНР.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Выводы

Устранение выявленных недостатков действующих вертикальных временных нормативных нагрузок на автодорожные мостовые сооружения всего мира может быть выполнено обоснованным выбором для дорог различного функционального назначения с учетом интенсивности движения на них нормативных колонн автомобилей или нормативных автомобилей с одновременным созданием адекватных их аналогов в виде эквивалентных нагрузок с известной для всех их связью с длиной и формой линий влияния силовых факторов в элементах мостовых сооружений или использованием программы нагружения произвольных линий влияния силовых факторов произвольными колоннами транспортных средств или отдельными автомобилями, что в настоящее время мною решается легко.

Я считаю, что мои предложения достойны внимания мостовиков всего мира, так как их реализация позволит сберечь громадные объе-

мы материальных и денежных средств и предотвратит возможные аварии автодорожных мостов в области их больших пролетов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. EN 1991-2 (2003) (English) [Text] : Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC] – 164 p.
2. AASHTO LRFD. Bridge Design Specifications, second edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 1992.
3. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчётные схемы нагружения и габариты приближения. – Введ. 2008-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 8 с.
4. Саламахин, П. Временные нагрузки на автодорожные мосты. Недостатки, их последствия, способы их устранения [Текст] / П. Саламахин. – Palmarium Academic Publishing, 2013 – 84 с.

П. М. САЛАМАХИН*

* Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский пр., 64, Москва, Россия, 125319, тел. +00 8 915 213 08 96, ел. почта pavel-salamahin@mail.ru

ДО ПИТАННЯ ЕКОНОМІЇ МАТЕРІАЛЬНИХ І ГРОШОВИХ РЕСУРСІВ ПРИ БУДІВНИЦТВІ МОСТОВИХ СПОРУД НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ УСЬОГО СВІТУ

У статті наведена критика діючих в країнах західної Європи, в США, Канаді, РФ, Україні, Білорусії і Казахстані нормативних тимчасових вертикальних навантажень для проектування автодорожніх мостових споруд та обґрунтовано необхідність їх заміни міркуваннями економії матеріальних і грошових ресурсів

Ключові слова: мостові споруди; нормативні навантаження; схеми навантаження; лінії впливу; вертикальні навантаження

Р. М. SALAMAHIN *

* Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64, Leningradsky prospect, Moscow, Russia, 125319, tel. +00 8 915 213 08 96, e-mail pavel-salamahin@mail.ru

SAVING THE ISSUE OF MATERIAL AND CASH RESOURCES IN CONSTRUCTION BRIDGES ON HIGHWAYS WORLD

The article presents the critique of existing in Western Europe, the USA, Canada, Russia, Ukraine, Belarus and Kazakhstan regulatory temporary vertical loads for the design of highway bridges and the necessity of their replacement by considerations of economy of material and financial resources.

Keyword: bridge construction; regulatory download; loading scheme; the impact of the line; vertical load

© П. М. Саламахин, 2016

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

REFERENCES

1. EN 1991-2 (2003) (English) [Text] : Eurocode 1: *Actions on structures* – Part 2: *Traffic loads on bridges* [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC] – 164 p.
2. AASHTO LRFD. Bridge Design Specifications, second edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 1992.
3. Natsionalnyy standart Rossiyskoy Federatsii GOST R 52748-2007. Dorogi avtomobilnye obshchego polzovaniya. Normativnye nagruzki, raschetnye skhemy nagruzheniya i gabarity priblizheniya [State Standard R 52748-2007. Highway public. Normative load, the calculated load circuit and approach dimensions]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 8 p.
4. Salamakhin P. *Vremennye nagruzki na avtodorozhnye mosty. Nedostatki, ikh posledstviya, sposoby ikh ustraneniya* [Temporary load on road bridges. Disadvantages, their implications, their solutions]. Palmarium Academic Publishing, 2013. 84 p.

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна), д.т.н., проф. А. І. Лантухом-Лященко (Україна).

Поступила в редколлегию 30.08.2016.

Принята к печати 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.138:[624.132.3:666.94]

А. І. ЮХИМЕНКО*

* Кафедра «Промислового та цивільного будівництва», Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (095) 447 13 65, ел. пошта winner.wcar@gmail.com, ORCID 0000-0003-4231-9602

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТВОРЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ АРМОЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ УКРІПЛЕННЯ ҐРУНТІВ ОСНОВ СПОРУД ЗА БУРОЗМІШУВАЛЬНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

Мета. Дослідити процес утворення горизонтальних ґрунтоцементних армоелементів та виявити вплив обертального і лінійного рухів робочого органу - бурозмішувача на формування характеристик ґрунтоцементу. **Методика.** Влаштування експериментальних горизонтальних ґрунтоцементних армоелементів виконано по бурозмішувальній технології. Досліджений вплив технологічних факторів на процес утворення горизонтальних ґрунтоцементних армоелементів та на формування механічних характеристик ґрунтоцементу. Дослідження механічних характеристик виконувалось неруйнівним ударно-імпульсним методом. **Результати.** Для забезпечення можливості дослідити вплив технологічних чинників на формування механічних характеристик одношвидкісний станок горизонтального буріння удосконалений наділенням станка трьома швидкостями обертального та лінійного рухів трилопатевого бурозмішувача нової конструкції. При утворенні горизонтальних ґрунтоцементних армоелементів в укріплюючій товщі ґрунту на різних ділянках по довжині, бурозмішувачу задавали різні технологічні параметри. Після 7 діб твердіння ґрунтоцементної суміші армоелементи розкривались і через кожні 7 діб подальшого твердіння досліджувались. **Наукова новизна.** Встановлена залежність зміни механічних характеристик ґрунтоцементу від зміни технологічних параметрів їх утворення. **Практична значимість.** Результати досліджень забезпечують можливість встановлення раціональних технологічних режимів підсилення основ споруд для отримання необхідних характеристик ґрунтоцементних армоелементів.

Ключові слова: технологія підсилення основ ґрунтів; армування ґрунту; ґрунтоцемент; технологічні фактори; ударно-імпульсний метод; раціональні параметри

Вступ

Будівництво та експлуатація об'єктів на території зі складними ґрантовими умовами зазнають значних складнощів. Проблеми експлуатації будівель та споруд пов'язані із великою кількістю деформацій різного виду, які виникають по різних причинах, але частіше внаслідок нерівномірних деформацій основ через погіршення властивостей ґрунтів при негативному впливі техногенних чинників, наприклад замочуванні. Тому часто виникає нагальна проблема укріплення ґрунтів з метою зміцнення основ деформованих об'єктів.

Існують різні способи укріплення ґрунтів у тому числі армуванням. Але більшість технологій зорієнтовані на армування в вертикальному напрямку. Це ускладнює їх застосування для підсилення основ фундаментів існуючих деформованих будівель, що призводить до необхід-

ності демонтажу або порушення їх елементів та послідуного їх відновлення.

Більш ефективним способом підсилення основ існуючих споруд є горизонтальне армування ґрунтів, при якому під фундаментами деформованих споруд утворюють армуючі елементи. Актуальність горизонтального армування полягає в тому, що даним способом можливо підсилити основу без руйнування будівельних конструкцій існуючих споруд чи прибудованих або вбудованих приміщень. Ця обставина досягається тим, що армуючі елементи утворюють із котлованів або траншей, виготовлених за межами будівель або споруд, що дає можливість зміцнення основ без зупинки їх експлуатації та без відселення мешканців.

Технологія підсилення основ армуванням ґрунтоцементними елементами має досить широкий спектр необхідності застосування в народному господарстві. В капітальному будів-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ництві [1-3]; при захисті пошкоджених будівель від подальших деформацій [4]; при укріпленні насипів [5, 6], у т.ч. насипів залізничних колій, захисті споруд від зсувів [7] та ін.

Для армування ґрунтів з метою підсилення основ споруд застосовують різні технології. Для підсилення земляного полотна, підвищення стійкості укосів залізничних колій застосовують геотекстильні матеріали [8, 9]. Дані технології досить ефективні в капітальному будівництві. Але при їх застосуванні для існуючих споруд виникають суттєві проблеми.

Як сказано вище, при підсиленні основ існуючих споруд більш ефективно застосовувати технологію горизонтального армування ґрунтів, яка досить добре адаптована до вимог улаштування земельного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії [10].

Відомий спосіб підсилення основ в горизонтальному напрямку є підведення жорстких конструкцій під фундаменти шляхом їх задавлювання в ґрунт основи [11]. Такий спосіб забезпечує високу несучу спроможність основи, але він потребує занадто потужний та габаритний прес для задавлювання труб, залізобетонних чи других конструкцій, спосіб складний у застосуванні та занадто вартісний.

Підсилюють основи в горизонтальному напрямку шляхом укріплення ґрунтів силікатизацією, для чого із котловану забивають ін'єктори в горизонтальному напрямку і через них нагнітають розчин силікат натрію [12]. Через не технологічність способу і значну вартість рідкого скла метод застосовується досить рідко.

Горизонтальне підсилення основ виконують також із застосуванням пневмопробійників, якими із котловану пробивають горизонтальну свердловину і потім в її порожнині різними технологіями утворюють жорсткий елемент [13].

В останній час все більш широкого впровадження набуває бурозмішувальний спосіб поліпшення властивостей ґрунтів шляхом їх армування ґрунтоцементними елементами

Бурозмішувальна технологія (БЗТ) армування ґрунтів застосовується в різних напрямках для різних цілей. Горизонтальне армування ґрунтів частіше застосовується для укріплення основ існуючих будівель при реконструкції та при захисті пошкоджених будівель від подальших деформацій [14].

В науково-технічних джерелах досить добре висвітлені результати досліджень властивостей ґрунтоцементну, способи впровадження БЗТ та ін., але недостатньо розглянуті питання ролі та впливу технологічних чинників на процес утворення горизонтальних ґрунтоцементних армуючих елементів (ГЦАЕ) та формування їх міцнісних характеристик.

Мета

Дослідити процес утворення горизонтальних ГЦАЕ та виявити вплив обертального і лінійного рухів робочого органу – бурозмішувача на формування характеристик ґрунтоцементну.

Методика

Укріплення ґрунту здійснено горизонтальним армуванням ГЦЕ по бурозмішувальній технології. Бурозмішувальні процеси – руйнування ґрунту, подрібнення зруйнованого ґрунту, просочування водоцементною суспензією, перемішування ґрунтоцементної суміші виконувалось розробленим трилопатеvim бурозмішувачем замість існуючого однолопатевого. Бурозмішувальні процеси виконувались за допомогою удосконаленого станка горизонтального буріння, наділеного трьома швидкостями обертального та лінійного рухів бурозмішувача, замість одношвидкісного існуючого. Експериментальні дослідження технології утворення ГЦАЕ та впливу технологічних факторів на формування характеристик ґрунтоцементну виконано в польових умовах. ГЦАЕ утворювали шляхом зміни технологічних параметрів на різних ділянках по довжині. Після твердіння ГЦАЕ на протязі 7 діб вони були розкриті і досліджені через кожні наступні 7 діб твердіння. Дослідження зміни характеристик ґрунтоцементну на відповідних ділянках відбувалось неруйнівними методами, а також шляхом відбору зразків на ділянках зміни технологічних параметрів та їх дослідження на гідравлічному пресі.

Результати

Основним технологічним процесом в БЗТ є бурозмішування, який включає в себе: різання ґрунту, його подрібнення, просочування подрібненого ґрунту водоцементним розчином та ретельне перемішування ґрунтоцементної суміші. Головним технологічним інструментом

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

при виконанні даної технологічної операції є бурозмішувач. Розроблена та виготовлена нами нова конструкція трилопатевого бурозмішувача (патент України №73029) [15], на відміну від існуючої однолопатевої, показала досить добрі результати у всіх відношеннях. Дана конструкція складається із трьох лопатей (рис. 1). Права лопать має вигляд нисхідних ріжучих елементів, середня – плоска пластина, ліва – із висхідними ріжучими елементами, які жорстко з'єднані між собою. Кожна лопать має свою функцію та призначення.



Рис. 1. Трилопатевий бурозмішувач

Від товщини стружки різання та ступеню подрібнення зруйнованого ґрунту залежить якість просочування його цементною суспензією і перемішування суміші, що впливає на якість утворення ГЦЕ.

Запропонований бурозмішувач поступово врізається в ґрунт при його обертанні та осьовому переміщенні буровим станком і руйнує ґрунт на початковому етапі у вигляді конуса. Розглянемо схему різання та подрібнення ґрунту. На рис. 2 схематично показаний розріз ґрунту на початковій стадії врізання та руйнування ґрунту.

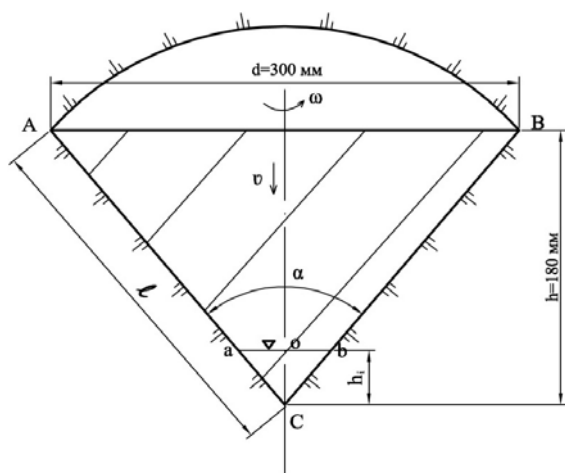


Рис. 2. Схема для визначення товщини стружки різання ґрунту при бурозмішувальній технології укріплення

Поперечний переріз форми зруйнованого ґрунту на початковій стадії має конусоподібний вигляд. Висота конуса по вісі h дорівнює висоті нижньої лопаті, діаметр основи конуса d має розмір довжини середньої лопаті, твірна конуса l дорівнює довжині бокового ребра нижньої лопаті. Площина перерізу конуса врізання бурозмішувача в ґрунт має форму трикутника ABC , кут при вершині конуса $\angle ACB = \alpha$.

Для визначення товщини різання стружки приймаємо припущення, що бурозмішувач при обертанні із швидкістю ω об/хв і осьовому переміщенні v м/хв врізається в ґрунт і описує за один оберт елементарну конічну поверхню із висотою h_i , елементарний розріз якого має форму елементарного трикутника abC . Товщина стружки, яка зрізається ножом бурозмішувача ∇ буде дорівнювати катету ao елементарного трикутника aoC . Із співвідношення сторін ΔaoC маємо:

$$\nabla = ao = oc \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = h_i \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

де h_i – висота елементарної конічної поверхні, яка дорівнює глибині врізання (занурювання) бурозмішувача за один його оберт.

Удосконалений станок горизонтального буріння має три швидкості осьового переміщення $v_1=0,44$ м/хв., $v_2=0,68$ м/хв., $v_3=0,92$ м/хв. і три швидкості обертань бурозмішувача $\omega_1=86$ об/хв., $\omega_2=112$ об/хв., $\omega_3=138$ об/хв. Для прикладу розрахунку приймаємо середні швидкості $v_2=0,68$ м/хв. і $\omega_2=112$ об/хв. Довжина середньої лопаті, яка обумовлює діаметр руйнування ґрунту і, отже, діаметр формування ГЦЕ дорівнює $d=300$ мм, висота нижньої лопаті бурозмішувача $h=180$ мм. При таких конструктивних і технологічних параметрах час занурювання бурозмішувача в ґрунт відбувається за:

$$t = \frac{h}{v} = \frac{180 \text{ мм}}{680 \text{ мм/хв}} = 0,264 \approx 0,26 \text{ хв}. \quad (2)$$

Величина занурювання бурозмішувача в ґрунт за один оберт дорівнює:

$$h_i = \frac{v}{n} = \frac{680 \text{ мм/хв}}{112 \text{ об/хв}} = 6,1 \text{ мм / об}. \quad (3)$$

Тоді товщина стружки різання ґрунту буде:

$$\nabla = h_i \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 6,1 \text{ мм} \cdot 0,833 = 5,1 \text{ мм}. \quad (4)$$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Окрім конструктивних параметрів бурозмішувача на процес формування ГЦЕ впливають технологічні параметри. При розрахунках несучої здатності та деформативності при проектуванні укріплених основ виникають питання по механічним та деформаційним характеристикам укріплених ґрунтів. В зв'язку з цим було досліджено питання впливу технологічних факторів на формування цих характеристик при влаштуванні ГЦЕ.

В процесі експериментальних досліджень були виготовлені ГЦЕ при різних комбінаціях зміни технологічних параметрів – швидкості обертань та лінійної швидкості бурозмішувача. Після тужавіння на протязі 7 діб ГЦЕ були розкриті та досліджені на предмет: набору міцнісних показників у часі, поверхневої твердості ГЦЕ та міцності на стиск через кожні 7 діб твердіння; досліджена зміна цих показників по довжині ГЦЕ при зміні технологічних чинників; досліджене питання анізотропії ґрунтоцементу.

ГЦЕ по довжині їх утворення поділили на ділянки у відповідності до тих чи інших показників швидкості обертань та лінійної швидкості руху бурозмішувача. Кожна ділянка розмічена із інтервалом 10 см на ділянки, на яких набиралася статистика вимірювання поверхневої твердості на різних етапах досліджень неруйнівним методом, та на яких відбиралися моноліти після 35 діб твердіння для лабораторних досліджень призової міцності на стиск з метою виявлення впливу технологічних чинників на тенденцію зміни вказаних характеристик. Дані цих досліджень будуть використані при розробці рекомендацій з раціонального вибору елементів технологічного процесу при підсиленні основ фундаментів укріпленням ґрунтів деформованих будівель, споруд шляхом горизонтального армування ґрунтоцементними елементами за БЗТ.

Твердість ґрунтоцементу утворених ГЦЕ досліджувалась неруйнівним ударно-імпульсним методом за допомогою вимірювального приладу «Онікс». Даний метод заснований на принципі кореляційної залежності параметрів ударного імпульсу від пружно-пластичних властивостей контрольованого матеріалу.

Прилад складається із електронного блоку і склерометра. Процес замірювання твердості ГЦЕ показаний на рис. 3. Для виконання за-

мірів зусиллям пружини приладу індентором склерометра наноситься удар по замірювальній поверхні. При ударі перетворювач виробляє сигнал, пропорційний поверхневій твердості предмета замірювання, який реєструється електронним блоком і перетворюється в цифровий показник в МПа.



Рис. 3. Вимірювання твердості ґрунтоцементу приладом «Онікс-2,5»

За даними цих вимірювань побудовані графіки (рис. 4) зміни твердості ґрунтоцементу в залежності від зміни швидкості обертань бурозмішувача (див. рис. 4,а) та при зміні швидкості лінійного руху (див. рис. 4,б).

Досліджувалась також призова міцність на стиск по довжині ГЦЕ на ділянках зміни технологічних параметрів. Для цього на відповідних ділянках полою коронкою відбиралися циліндричні моноліти з яких виготовлялися дослідні зразки і досліджувались на стиск на гідравлічному пресі (рис. 5). На рис. 6 показаний графік розподілу призової міцності на стиск по довжині ГЦЕ при різних технологічних параметрах.

Аналіз наведених графіків вказує на загальну тенденцію зміни відповідних характеристик механічних властивостей ґрунтоцементу при зміні технологічних параметрів при утворенні ГЦЕ, а саме: а) зі збільшенням швидкості обертань бурозмішувача на всіх етапах твердіння ґрунтоцементної суміші рівень механічних характеристик збільшується; б) при підвищенні лінійної швидкості значення характеристик навпаки зменшується, що свідчить про погіршення умов бурозмішування.

Результати даних досліджень використані при розробці рекомендацій по раціональному вибору технологічних рішень горизонтального армування ґрунтів.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

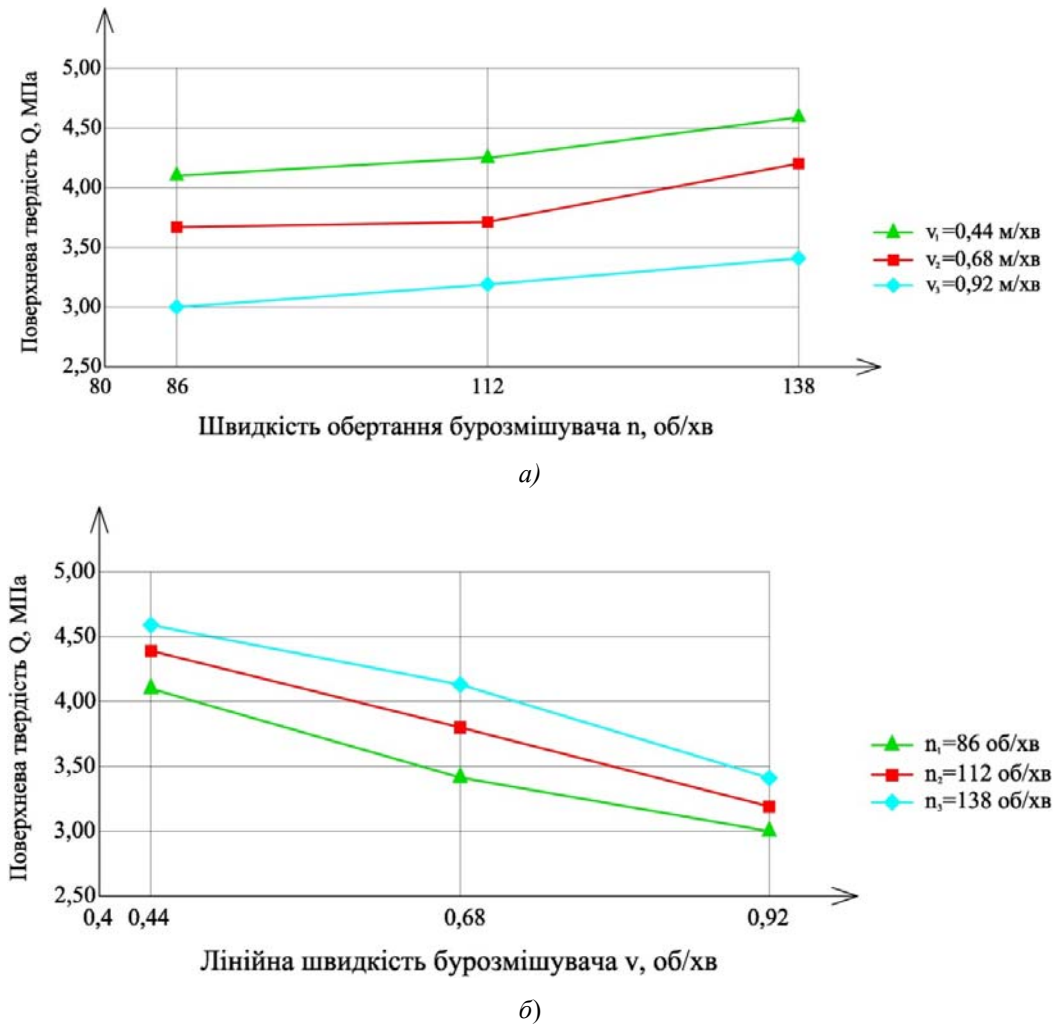


Рис. 4. Графіки зміни поверхневої твердості в залежності від зміни швидкостей бурозмішувача (через 28 діб твердіння): *а* – обертального руху; *б* – лінійного руху



а)



б)



в)

Рис. 5. Дослідження призмової міцності ГЦЕ:
а) – процес відбору монолітів з ГЦЕ; *б*) – відібрані та підготовлені зразки для випробування;
в) – гідравлічний прес та зруйнований зразок

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

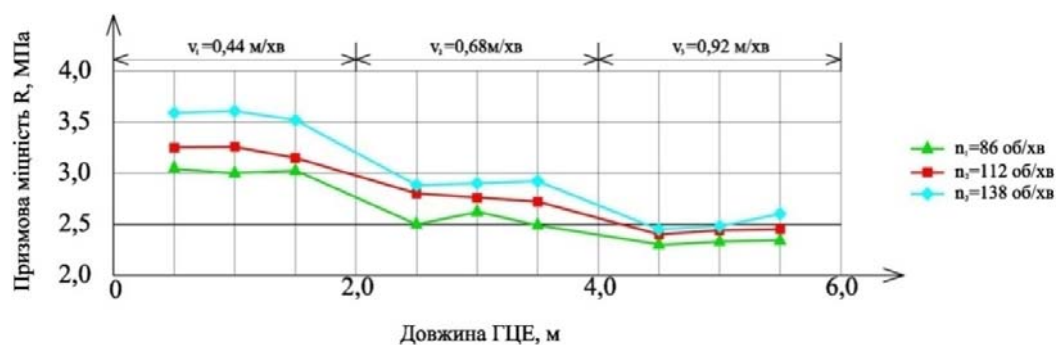


Рис. 6. Графік зміни призмової міцності по довжині ГЦЕ при зміні лінійної та обертальної швидкостей бурозмішувача (у віці 35 діб твердіння)

В процесі даних досліджень встановлено, що на відміну від природної структури ґрунтів, де анізотропія досягає суттєвих значень, анізотропія ґрунтоцементу в ГЦЕ нівелюється – призмova міцність зразків, відібраних в поздовжньому і поперечному напрямках в одних і тих же зонах (торцевих) ГЦЕ, має практично ідентичне значення – відповідно 3,52 і 3,54 МПа, що свідчить про ізотропність ґрунтоцементу.

Наукова новизна та практична значимість

За результатами роботи встановлена залежність зміни механічних характеристик ґрунтоцементу від зміни технологічних параметрів їх утворення. Результати досліджень забезпечують можливість встановлення раціональних технологічних режимів підсилення основ споруд для отримання необхідних характеристик ґрунтоцементних армоелементів.

Висновки

1. Процес бурозмішування зруйнованого та подрібненого ґрунту із водоцементним розчином залежить від ступеню подрібнення зруйнованого ґрунту, тому розглянуто питання технології різання ґрунту новою трилопатевою конструкцією бурозмішувача.

2. На якість утворення горизонтальних ГЦЕ впливають технологічні чинники – швидкість обертання робочого органу – бурозмішувача та швидкість його лінійного переміщення. Встановлено, що механічні характеристики ґрунтоцементу підвищуються зі збільшенням обертання і навпаки зменшуються при збільшенні лінійної швидкості, що вказує на погіршення умов бурозмішування.

3. Експериментально встановлено, що анізотропія ґрунтоцементу в горизонтальних ГЦЕ

нівелюється внаслідок корінної зміни структури ґрунту при руйнуванні, перемішуванні зруйнованого ґрунту із водоцементною суспензією та твердіння суміші.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зоценко, М. Л. Досвід і перспективи підсилення основ вертикальними ґрунтоцементними елементами у міському будівництві [Текст] / М. Л. Зоценко, Ж. М. Бовкун, В. І. Маляренко // Бетон и железобетон в Украине. – 2006. – № 6. – С. 24-28.
2. Петренко, В. И. Обоснование параметров химического закрепления грунтов при строительстве Киевского метрополитена [Текст] / В. И. Петренко, В. Д. Петренко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2013. – Вип. 4. – С. 60-66.
3. Shibasaki, M. State of Practice of Jet Grouting [Text] / M. Shibasaki // Grouting and Ground Treatment: Proceedings of the Third International Conference. New Orleans, Louisiana, 2003, Volume 1, pp. 198-217.
4. Степура, И. В. Горизонтальное армирование грунтов в основаниях зданий [Текст] / И. В. Степура, В. С. Шокарев, А. В. Павлов, Р. В. Самченко, С. И. Степура // Міжвідомчий наук.-техн. зб. Наук. Праць (будівництво). – Київ : НДІБК, 2007. – Вип. 66. – С. 117-122.
5. Крысан, В. И. Армирование насыпи подходов земляного полотна к путепроводу ґрунтоцементными сваями [Текст] / В. И. Крысан, В. В. Крысан // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. – Київ : НДІБК, 2007. – Вип. 66. – С. 204-211.
6. Harris, R. R. W. Construction of a jet mix cut-off of Thika Dam. Kenya. [Текст] / R. R. W. Harris, J. Morey // Proc. Conf. Grouting in the Ground. Bell A. L. Ed. Lust. Of Civil Engineers, London, 2004, pp. 155-171.
7. Великодний, Ю. Й. Зміна характеристик міцності ґрунтів при їх закріпленні за допомогою це-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- ментації [Текст] / Ю. Й. Великодний, М. Л. Зощенко, І. І. Карцева, А. М. Ягольник // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. – Київ : НДІБК, 2008. – Вип. 71. – кн. 2. – С. 51-60.
8. Петренко, В. Д. Дослідження підвищення несучої здатності земляного полотна для швидкісного руху потягів [Текст] / В. Д. Петренко, В. П. Купрій, М. А. Лісневський, В. М. М. Алхдур // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 2. – С. 50-55.
 9. Меньлюк, А. І. Методика експериментальних досліджень устійності откосів, арморованих геотекстильними матеріалами [Текст] / А. І. Меньлюк, А. В. Федорук // Ресурсоєкономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2006. – № 14. – С. 415–420.
 10. Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії [Текст]: ЦП-0203 Затв.: Наказ Мінтрансу та зв'язку України від 25.12.2008, № 557-ЦЗ / Мін-во трансп. та зв'язку України. – Київ, 2009. – 44 с.
 11. Саурин, А. Н. Основания фундаментов – шпальный распределитель [Текст] / А. Н. Саурин, Ю. А. Багдасаров // Труды международного семинара по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям. – Москва, 2000. – С. 80-83.
 12. Губкин, В. А. Усиление оснований и фундаментов при реконструкции зданий и сооружений [Текст] / В. А. Губкин, Н. Б. Соловьев, В. Г. Голиков // Будівельні конструкції : зб. наук. праць. – Київ : НДІБК, 2008. – Вип. 53. Кн. 1. – С. 89-94.
 13. Бартоломей, А. А. Технология усиления оснований фундаментов с помощью управляемых пневмопробойников [Текст] / А. А. Бартоломей, Л. В. Янковский // Устройство и усиление фундаментов с улучшением строительных свойств грунтов оснований. Пенза, ПДЭНТЗ, 1991. – 132 с.
 14. Юхименко, А. И. О проблемах реконструкции зданий и способах их решения [Текст] / Р. В. Самченко, Л. В. Щербина, И. В. Степура, А. И. Юхименко // Известия вузов. Строительство – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2013. – Вып. 9(657) – С.115-122.
 15. Пат. 73029 UA, МПК E02D 3/12 (2006.01). Бурозмешивальное долото: / І. В. Степура, Р. В. Самченко, В. С. Шокарев, А. І. Юхименко, С. І. Степура (UA); заявник і патентовласник Запорізька державна інженерна академія (UA). – № u 201201856; заявл. 20.02.12; опубл. 10.09.12, Бюл. № 17. – 6 с.

А. И. ЮХИМЕНКО*

* Кафедра «Промышленного и гражданского строительства», Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38 (095) 447 13 65, эл. почта winner.wcar@gmail.com, ORCID 0000-0003-4231-9602

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ АРМОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ ПО БУРОСМЕСИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Цель. Исследовать процесс образования горизонтальных грунтоцементных армоэлементов и выявить влияние вращательного и линейного движений рабочего органа – буросмесителя на формирование характеристик грунтоцемента. **Методика.** Устройство экспериментальных горизонтальных грунтоцементных армоэлементов выполнено по буросмесительной технологии. Исследовано влияние технологических факторов на процесс образования горизонтальных грунтоцементных армоэлементов и на формирование механических характеристик грунтоцемента. Исследование механических характеристик выполнялось неразрушающим ударно-импульсным методом. **Результаты.** Для обеспечения возможности исследовать влияние технологических факторов на формирование механических характеристик односкоростной станок горизонтального бурения усовершенствован оснащением станка тремя скоростями вращательного и линейного движений трехлопастного буросмесителя новой конструкции. При устройстве горизонтальных грунтоцементных армоэлементов в укрепляемой толще грунта на разных участках по длине, буросмесителю задавали различные технологические параметры. После 7 суток твердения грунтоцементной смеси армоэлементы вскрывались и через каждые 7 суток дальнейшего твердения исследовались. **Научная новизна.** Установлена зависимость изменения механических характеристик грунтоцемента от изменения технологических параметров их устройства. **Практическая значимость.** Результаты исследований обеспечивают возможность выбора ра-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

циональных технологических режимов усиления оснований сооружений для получения необходимых характеристик грунтоцементных армоэлементов.

Ключевые слова: технология усиления оснований грунтов; армирование грунта; грунтоцемент; технологические факторы; ударно-импульсный метод; рациональные параметры

A. I. YUKHYMENKO*

* Department of Industrial and Civil Construction, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Soborny Ave., 226, Zaporizhzhya, Ukraine, 69006, tel. +38 (095) 447 13 65, e-mail winner.wcar@gmail.com, ORCID 0000-0003-4231-9602

INVESTIGATION OF FORMATION OF HORIZONTAL REINFORCING ELEMENTS FOR CONSTRUCTION BASE STRENGTHENING BY SOIL-MIXING TECHNOLOGY

Purpose. Explore the process of formation of horizontal grouting reinforcing elements and reveal the influence of rotational and linear movement of the working body – soil mixer under formation soil-cement characteristics. **Methodology.** The formation of experimental horizontal soil-cement reinforcing elements performed by soil-mixing technology. The influence of technological factors on the formation of horizontal soil-cement reinforcing elements and the formation of the mechanical characteristics of soil-cement. Investigation of mechanical characteristics performed by nondestructive shock pulse method. **Findings.** To be able to investigate the influence of technological factors on the mechanical properties of single-speed machine horizontal drilling machine equipment improved three-speed rotary and linear motions three-bladed soil-mixer new design. The formation of horizontal soil-cement reinforcing elements in the thicker soil was at different locations along the length soil-mixer set various process parameters. After 7 days of hardening mixture of soil-cement reinforcing elements were opened and every 7 days of hardening were investigated further. **Originality.** Established the dependence of the mechanical characteristics of soil-cement from changes of technological parameters. **Practical value.** The research results provide a choice of rational technological modes for strengthening structures bases for obtaining the necessary characteristics soil-cement reinforcing elements.

Keywords: technology of soil base strengthening; reinforcement of soil; soil-cement; technological factors; shock pulse method; rational parameters

REFERENES

1. Zocenko M. L., Bovkun Zh. M., Maljarenko V. I. Dosvid i perspektyvy pidsylennja osnov vertykal'nymy gruntocementnymy elementamy u misjkomu budivnytvi [Experience and perspectives of strengthening the foundations runtotsementnymy vertical elements in city building]. *Beton i zhelezobeton v Ukraine – Concrete and reinforced concrete in Ukraine*, 2006, no 6, pp. 24-28.
2. Petrenko V. I., Petrenko V. D. Obosnovanie parametrov khimicheskogo zakrepleniya gruntov pri stroitelstve Kievskogo metropolitena [Grounding of parameters of soils chemical grouting by kyiv underground construction]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2013, issue 4, pp. 60-66.
3. Shibazaki, M. State of Practice of Jet Grouting. *Grouting and Ground Treatment: Proceedings of the Third International Conference*. New Orleans, Louisiana, 2003, vol. 1, pp. 198-217.
4. Stepura I. V., Shokarev V. S., Pavlov A. V., Samchenko R. V., Stepura S. I. Gorizontalkoe armirovanie gruntov v osnovaniyakh zdaniy [Horizontal reinforcement of soils in the foundations of buildings]. *Mizhvidomchyj naukovy-zbirnyk naukovykh pracj (budivnytvo)*. Kyjiv, 2007, issue 66, pp. 117-122.
5. Krysan V. I., Krysan V. V. Armirovanie nasypi podkhodov zemlyanogo polotna k puteprovodu gruntocementnymi svayami [Reinforcement of embankment approaches to the overburden with overland cement piles]. *Budivelnjnyj konstrukciji. Mizhvidomchyj naukovy-zbirnyk*. Kyjiv, 2007. Issue 66. – pp. 204 – 211.
6. Harris, R.R. W. Construction of a jet mix cut-off of Thika Dam. Kenya. Proc. Conf. Grouting in the Ground. Bell A. L. Ed. *Lust. Of Civil Engineers*, London, 2004, pp. 155-171.
7. Velykodnyj Ju. J., Zocenko M. L., Karceva I. I., Jagholjnyk A. M. Zmina kharakterystyk micnosti gruntiv pry jikh zakriplenni za dopomoghoju cementaciji [Changing the strength characteristics of soils when they consolidate using grouting] / *Budivelnjnyj konstrukciji. Mizhvidomchyj naukovy-zbirnyk*. Kyjiv, 2008, issue 71. vol. 2, pp. 51-60.
8. Petrenko V. D., Kuprij V. P., Lisnevsjkyj M. A., Alkhdur V. M. M. Doslidzhennja pidvyshhennja nesuchoji zdatnosti zemljanogho polotna dlja shvydkisnogho rukhu potjaghiv [Investigation of carrying capacity increase

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- roadbed for fast train]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 2, pp. 50-55.
9. Menelyuk A. I., Fedoruk A. V. Metodika eksperimentalnykh issledovaniy ustoychivosti otkosov, armirovannykh geotekstilnymi materialami [he technique of experimental studies of the stability of slopes reinforced with geotextile materials]. *Resursoekonomni materialy, konstrukciji, budivli ta sporudy – Resursoekonomni materials, constructions and buildings*, 2006, no 14, pp. 415-420.
 10. CP -0203. *Pravyla ulashuvannja osnovnoji ploshhadky zemljanogho polotna pry vykonanni kapitalnogho remontu ta modernizaciji koliji* [Rules arrangement subgrade main platform while performing overhaul and modernization of the track]. Kyjiv, 2009. 44 p.
 11. Saurin A. N., Bagdasarov Yu. A. Osnovaniya fundamentov – shpalnyy raspredilitel [Foundation bases - sleeper distributor]. *Trudy mezhdunarodnogo seminaru po mekhanike gruntov, fundamentostroeniyu i transportnym sooruzheniyam*. Moscow, 2000 pp. 80-83.
 12. Gubkin V. A., Solovlev N. B., Golikov V. G. Usilenie osnovaniy i fundamentov pri rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy [Strengthening the foundations and foundations in the reconstruction of buildings and structures]. *Budivelni konstrukciji. Mizhvidomchyj naukoivo-tekhnichnyj zbirnyk*. Kyjiv, 2008, issue 53, vol. 1. pp.89-94.
 13. Bartolomey A. A., Yankovskiy L. V., Tekhnologiya usileniya osnovaniy fundamentov s pomoshchyu upravlyaemykh pnevmoproboynikov [Technology of reinforcing foundations of foundations with the help of controlled pneumatic punchers.] *Ustroystvo i usilenie fundamentov s uluchsheniem stroitelnykh svoystv gruntov osnovaniy* [Arrangement and reinforcement of foundations with improvement of building properties of base soils]. Penza, 1991. 132 p.
 14. Yukhimenko A. I., Samchenko R. V., Shcherbina L. V., Stepura I. V., O problemakh rekonstruktsii zdaniy i sposobakh ikh resheniya [On the problems of reconstruction of buildings and methods for their solution.] / *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo – Proceedings of high schools. Building*. Novosibirsk, 2013, issue 9(657), pp.115-122.
 15. Pat. 73029 UA, MPK E02D 3/12 (2006.01). Burozmishuvalne doloto: I.V. Stepura, R.V. Samchenko, V.S. Shokarev, A.I. Yukhymenko, S.I. Stepura (UA); zaiavnyk i patentovlasnyk Zaporizka derzhavna inzhenerna akademiia (UA). - № u 201201856; zaiavl. 20.02.12; opubl. 10.09.12, Biul. № 17. 6 p.

Стаття рекомендована до публікації д. т. н., проф. І. Д. Павловим (Україна), д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна).

Надійшла до редколегії 08.12.2016.

Прийнята до друку 26.12.2016.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.0.9.012.45-047.72

Ф. В. ЯЦКО*

* Кафедра «Мости та тунелі», Національний транспортний університет, вул. Суворова 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 044 280 79 78, ел. пошта fedor.yatsko@gmail.com

МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЗГИНАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ПРОЕКТУВАННІ

Мета. Науковий пошук моделі прогнозу життєвого циклу елементів автодорожніх мостів для інтеграції в САПР. **Методика.** Теоретичне вишукування. **Результати.** Доведена принципова можливість використання розробленої моделі прогнозу ресурсу при автоматизованому проектуванні залізобетонних згинаних елементів на заданий термін служби. **Наукова новизна.** Пропонується модель, призначена для прогнозування ресурсу елемента на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з проектування. **Практична значимість.** Запропоновано практичну методику оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів в процесі автоматизованого проектування.

Ключові слова: деградація захисного шару; корозія арматури; ресурс; життєвий цикл; характеристика безпеки

Вступ

Наукові пошуки останніх років із створення засад оцінювання і прогнозування технічного стану транспортних споруд [1-7, 9-12,] склали базу перших в Україні і СНД чинних нормативних документів, які сьогодні в системі експлуатації мостів регламентують обов'язкову процедуру інтегральної оцінки прогнозу технічного стану конструктивних елементів і споруди цілком в функції часу і, таким чином, прогнозувати її залишковий ресурс. Проте, згадані нормативні документи ще далекі від досконалості і потребуються значні зусилля з подальшого їх розвитку та вдосконалення.

Що ж стосується прогнозу ресурсу залізобетонних елементів на етапі проектування, то нам невідомі дослідження в СНД, які мають реальне практичне впровадження. Очевидно, що в цих умовах дослідження спрямовані на оцінку і прогноз довговічності залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів будуть відповідати інтересам суспільства і державній політиці в сфері техногенної і економічної безпеки.

Досвід експлуатації залізобетонних автодорожніх мостів України показав, що середній термін служби більшості прогонових будов складає 35...50 років [1], тоді як нормативний

термін служби має складати мінімум 70...100 років. За даними обласних експлуатаційних організацій кількість мостів, що знаходяться в 4 або 5 експлуатаційному стані і потребують терміново капітального ремонту або реконструкції, в 2000 році становила 220 одиниць, тоді як за станом на початок 2013 року кількість таких мостів збільшилася майже до 2000 одиниць.

Причини зниження очікуваного ресурсу є на всіх стадіях життєвого циклу споруди. Зараз визнається, що зниження середнього терміну служби закладається ще на стадії проектування споруди. Усталена практика розрахунків і конструювання не має важелів оцінки ресурсу елементів, термін служби призначається директивно, граничні рівняння стану елементів не мають зв'язку з часом експлуатації.

Мета

Наведені вище обставини і були спонукальним мотивом до розробки моделі прогнозування ресурсу залізобетонних елементів в рамках нової парадигми теорії споруд – пошук рівнянь напружено-деформованого стану елемента у функції часу. Центральна наукова ідея дослідження полягає в пошуку моделі зв'язку функції граничного стану з часом. Така постановка

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

задачі є елементом нової парадигми в теорії споруд. Дійсно, сьогодні всі фундаментальні рівняння теорії споруд прийняті такими, що не залежать від часу. Наше дослідження є одним з перших спроб зв'язати рівняння напружено-деформованого стану елементів споруд з часом.

Ця стаття присвячена розробці методики прогнозування ресурсу залізобетонних згинаючих елементів мостів в автоматизованому проектуванні, використовуючи якомога простий математичний апарат, який дозволив би легко інтегрувати його в САПР. Для цього використовується спроба зв'язати рівняння напружено-деформованого стану елементів споруд з часом, використавши напівімовірнісний підхід, який по суті є реалізацією аналітичної моделі, викладеної в роботі [12] з включенням апарату розрахунку коефіцієнта надійності.

Коефіцієнт надійності детерміністичної моделі

Коефіцієнт надійності строку служби – це відношення математичного очікування строку служби до розрахункового строку служби [13, 15]:

$$\gamma_t = \frac{\mu_{T_{\text{сп}}}}{T_g}, \quad (1)$$

де γ – коефіцієнт надійності строку служби; $\mu_{T_{\text{сп}}}$ – математичне очікування сорока служби, років; T_g – розрахунковий строк служби з заданою забезпеченістю, років.

За допомогою коефіцієнта надійності строку служби γ_t можна перейти від нормативного необхідного строку служби елемента, який відповідає максимально допустимій ймовірності відмови, до відповідного середнього проектного строку служби T_d [13, 15]:

$$T_d = \gamma_t T_g. \quad (2)$$

Коефіцієнт надійності строку служби залежить від максимально допустимої ймовірності відмови (рівня надійності) і від типу закону розподілу строку служби $T_{\text{сп}}$.

Коефіцієнти надійності строку служби визначимо, дотримуючись процедури Єврокодів, у функції характеристики безпеки [8, 14, 16]. Характеристика безпеки β вводиться на підставі фун-

даментальних принципів теорії ймовірностей і математичної статистики, за таких гіпотезах:

- припускається, що узагальнене опір R і узагальнений навантажувальний ефект E – суть випадкові величини;

- постулюється, що випадкові змінні R і E мають нормальний розподіл.

Коефіцієнт надійності строку служби γ_t визначимо як коефіцієнт надійності властивостей матеріалу γ_R у вигляді відношення характеристичного значення узагальненої змінної опору R до її розрахункового (проектного) значення:

$$\gamma_t = \gamma_R = \frac{R_k}{R_d}, \quad (3)$$

де R_k – характеристичне значення узагальненої змінної опору R ; R_d – її розрахункове значення узагальненої змінної опору R .

Прийнято характеристичні значення R_k визначати як 5 % квантиль [16]:

$$R_k = \mu_R \cdot e^{-1,645V_R}. \quad (4)$$

Розрахункове значення R_d визначається через характеристику безпеки для базового періоду повторюваності в 1 рік:

$$R_d = \mu_R e^{-\alpha_R \beta_\alpha V_R}, \quad (5)$$

де α_R – коефіцієнт чутливості; β_α – характеристика безпеки для базового періоду повторюваності в 1 рік; V_R – коефіцієнт варіації матеріалу; 1,645 – коефіцієнт приведення математичного очікування (середнього значення) змінної до її характеристичного значення, що відповідає 5 % забезпеченості (5 % квантиль змінної).

Внесемо в (1) вирази (4) і (5) і отримаємо вираз для коефіцієнта надійності строку служби γ_t :

$$\gamma_t = \frac{e^{-1,645V_Q}}{e^{-\alpha_R \beta_\alpha V_R}} = e^{(0,8\beta_\alpha V_R - 1,645V_Q)}. \quad (6)$$

Алгоритм прогнозування ресурсу

На схемі (рис. 1) показано алгоритм прогнозування ресурсу залізобетонних елементів автодорожніх мостів на стадії проектування. Він складається з наступних кроків:

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- формування вихідних конструкційних і експлуатаційних характеристик елемента;
- прогноз часу карбонізації захисного шару t_1 ;
- прогноз часу накопичення критичної концентрації хлоридів у поверхні арматури t_2 ;
- визначення часу корозії арматури t_3 ;
- визначення проектного строку служби елемента T_d ;
- визначення коефіцієнта надійності строку служби γ_t ;
- визначення розрахункового строку служби T_g з забезпеченістю 95 %.

Час карбонізації захисного шару визначимо залежністю:

$$t_1 = \frac{m_0 \cdot x^2}{2 \cdot D_e \cdot C_0}, \quad (7)$$

де x – товщина захисного шару, м; D_e – ефективний коефіцієнт дифузії (згідно СНиП 2.03.11-85); m_0 – реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні.

Реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні згідно документу [5]

$$m = 3 \cdot \frac{\omega}{c} - 0,6. \quad (8)$$

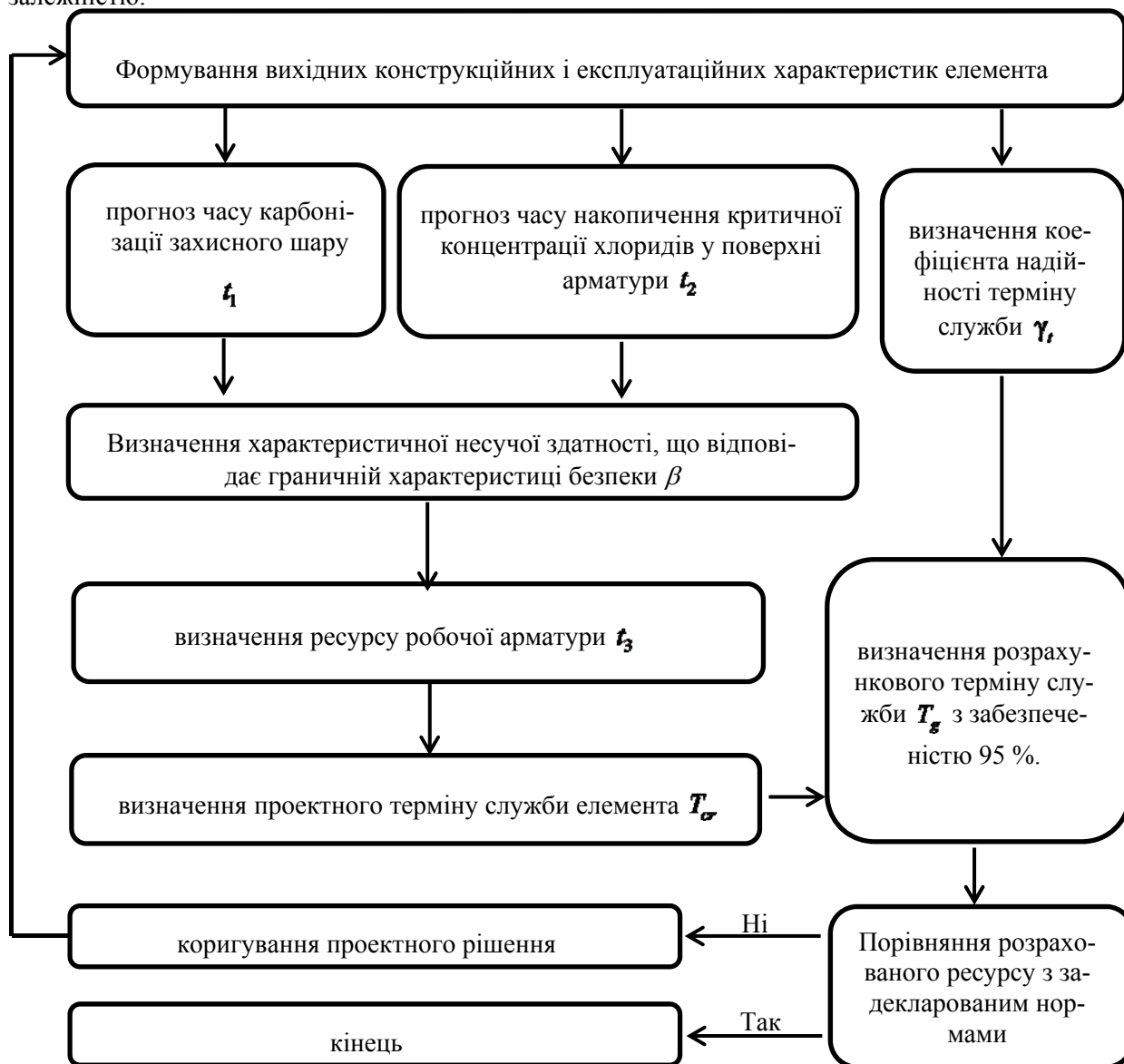


Рис. 1. Логічна схема алгоритму обчислення розрахункового строку служби

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Час досягнення критичної концентрації хлоридів на рівні робочої арматури на глибині x :

$$t_2 = \frac{1}{K_{\text{еф}} \cdot D_0} \left[\frac{x}{2 \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{CR} - C_1}{C_S - C_1} \right)} \right]^2, \quad (9)$$

де C_S – концентрація хлорид-іонів на поверхні елемента; C_1 – початкова концентрація хлорид-іонів всередині бетону; C_{CR} – концентрація хлорид-іонів на глибині x , необхідна для початку активної корозії арматури; $\text{erf}(\cdot)$ – функція помилок; $K_{\text{еф}}$ – коефіцієнт ефективності; D_0 – початковий коефіцієнт дифузії з урахуванням впливу складу бетону λ і вмісту летючої золи (ξ , %) [2]:

$$K_{\text{еф}} = \left[1 + \frac{(1-H)^4}{(1-H_c)^4} \right]^{-1} \cdot e^{\left(\frac{1}{K_0} - \frac{1}{K} \right)} \cdot \left[1 + A \left(\frac{\sigma}{f} \right) \right]^2, \quad (10)$$

де H – відносна вологість; H_c – критична вологість; q – константа активації дифузії; K_0 – нормальна температура; K – температура; A – коефіцієнт, що залежить від типу напружень в бетоні (при стисканні -0,0236; розтягу +0,0496); σ – напруження в бетоні; f – гранична міцність бетону.

$$D_0 = 10^{(-12,06 + 2,4B/C)} \lambda \xi, \quad (11)$$

де B/C – водоцементне відношення.

Математичне очікування несучої здатності, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

$$\mu_R(\beta) = - \frac{\mu_Q + \beta \cdot \mu_Q \sqrt{V_Q^2 - V_Q^2 \cdot V_R^2 \cdot \beta^2 + V_R^2}}{V_R^2 \cdot \beta^2 - 1}, \quad (12)$$

де V_Q – коефіцієнт варіації узагальненого навантаження; V_R – коефіцієнт узагальненої опірності елемента; μ_R – математичне очікування узагальненого опору елемента; μ_Q – математичне очікування узагальненого навантаження елемента.

Характеристична несуча здатність $M_{\beta n}$, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

$$M_{\beta n} = \mu_R(\beta) \cdot (1 - 1,64V_Q). \quad (13)$$

Вираз для отримання різниці ΔM_n між проектною характеристичною несучою здатністю M_{0n} , що відповідає проектній характеристиці безпеки $\beta(0)$ та несучою здатністю $M_{\beta n}$, що відповідає $\beta(i)$ обраного експлуатаційного стану:

$$\Delta M_n = M_{0n} - M_{\beta n}. \quad (14)$$

Рівняння зміни діаметру арматури від корозії арматури в умовах карбонізованого бетону Δd_c :

$$\Delta d_c = 2v_c(t_2 - t_1), \quad (15)$$

де, v_c – швидкість корозії арматури в умовах карбонізованого бетону.

Ресурс арматури

$$t_3 = \frac{\gamma_C}{2v_{\text{corr}}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4R_{bn}b \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2\Delta M_n}{R_{bn}bh_{01}^2}} \right)}{R_{sn}\pi n_1\gamma_C^2}} \right), \quad (16)$$

де R_{sn} – нормативний опір арматури на розтяг (МПа); R_{bn} – нормативний опір бетону на стиск (МПа); h_{01} – робоча висота перерізу шару арматури, що розташована на глибині захисного шару; b – ширина перерізу (м),

$$\gamma_C = d - \Delta d_c. \quad (17)$$

З урахуванням впливу напружень, температури та вологості на швидкість корозії арматури:

$$v = v_0 \exp \left(\frac{V \cdot \sigma}{R \cdot T} \right), \quad (18)$$

де v_0 – швидкість корозії за відсутності напружень (мкм/рік, згідно з RILEM [17] в умовах хлориднасиченого середовища 98 мкм/рік.); V – мольний об'єм кородуючого металу (м³/моль); σ – напруження в арматурі (МПа); R – універсальна газова стала 8,314472 Дж/(моль·К); T – температура (К).

В термінах часу, ресурс елемента:

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$T_{cr} = t_2 + t_3, \quad (19)$$

де перший період життєвого циклу t_1 – період депасивації захисного шару, арматура не кородує ($t_1 = t_c$) відсутній через те що він повністю завершується впродовж другого періоду життєвого циклу; другий період життєвого циклу t_2 – період, впродовж якого арматура кородує в умовах карбонізованого бетону, концентрація хлоридів недостатня для активації хлоридної корозії; третій період t_3 – період активної хлоридної корозії, характеризується активним зниженням несучої здатності в часі.

Коефіцієнт варіації матеріалу композитного елемента:

$$V_R = \sqrt{\sum_1^m V_{Ri}^2 + \sum_1^m V_{Ri}^2 V_{Rj}^2}, \quad (20)$$

де m – кількість матеріалів, що містяться в композитному елементі.

Коефіцієнт варіації узагальненого навантаження на елемент:

$$V_R = \sqrt{\sum_1^m V_{Ri}^2 + \sum_1^m V_{Ri}^2 V_{Rj}^2}, \quad (21)$$

де m – кількість навантажень, що діють на переріз елемента.

Математичне очікування узагальненого опору елемента:

$$\mu_R = \frac{M_u}{1 + 1,64V_R}, \quad (22)$$

де M_u – характеристична несуча здатність перерізу за моментом.

Математичне очікування узагальненого навантаження на елемент:

$$\mu_Q = \frac{M_{max}}{1 + 1,64V_Q}, \quad (23)$$

де M_{max} – характеристичний згинальний момент від всіх типів навантаження.

Характеристика безпеки:

$$\beta = \frac{\frac{\mu_R}{\mu_Q} - 1}{\sqrt{V_Q^2 + \left(\frac{\mu_R}{\mu_Q}\right)^2 V_R^2}}. \quad (24)$$

Коефіцієнт надійності строку служби γ_t :

$$\gamma_t = e^{(0,8\beta V_R - 1,645V_R)}. \quad (25)$$

Розрахунковий ресурс елемента:

$$T = T_{cr} \gamma_t. \quad (26)$$

Висновки

1. Запропоновано імовірнісне трактування прогнозу ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів.

2. Вперше запропонована практична інженерна методика прогнозування ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів заданої надійності. Методика в повній мірі відповідає національним нормам ДБН В.1.2-14:2009 [4] та Єврокоду [8,16].

3. Запропонована методика дає можливість на етапі проектування оцінити ресурс елемента, поєднуючи в собі не тільки характеристики самого перерізу і навантажень, але і умови середовища. Таким чином проектувальник на етапі проектування має апарат, що дозволить обґрунтувати з певним рівнем не тільки надійності, а і довговічності розроблений варіант поперечного перерізу елемента. Такий підхід відкриває шлях для оцінки ефективності використання ресурсів та розбудови життєвого циклу, близького до реальності, дає можливість прогнозувати експлуатаційні витрати, являє собою інструмент для керування довговічністю в системах автоматизованого проектування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бліхарський, З. Я. Моделирование коррозионных разрушений железобетонных балок в агрессивном окружении [Текст] / З. Я. Бліхарський, М. Г. Сташук, О. М. Малик // Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж. – Донецьк, 2003. – Вип. 6. – С. 48–55.
2. Бондаренко, В. М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона [Текст] / В. М. Бондаренко, С. В. Бондаренко. – Москва : Стройиздат, 1981. – 210 с.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

3. ВБН В.3.1-218-174-2002. Мости та труби. Оцінка технічного стану мостів, що експлуатуються [Текст]. – Київ : Державна служба автомобільних доріг України, 2001. – 74 с.
4. ДБН В.1.2-14:2009 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – Надано чинності 2009-12-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 36 с.
5. ДСТУ-Н Б. В.2.3-23:2009 Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів [Текст]. – На заміну ВБН В.3.1-218-174-2002 Мости та труби. Оцінка технічного стану автодорожніх мостів, що експлуатуються ; надано чинності 2009-11-11. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 49 с.
6. Лантух-Лященко, А. І. О прогнозе остаточного ресурса моста [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Дороги і мости. – Київ : ДерждорНДІ, 2007. – Вип. 7. – Т. 2. – С. 3–9.
7. Лантух-Лященко, А. І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 1999. – Вип. 57 – С. 183–188.
8. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008. Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT) [Текст]. – Надано чинності 2013-07-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. – 116 с.
9. Перельмутер, А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – Москва : Издательство ассоциации строительных вузов, 2007. – 185 с.
10. Редченко, В. П. Моніторинг технічного стану мостів методами пасивної вібраційної діагностики [Текст] / В. П. Редченко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 33. – С. 223-227
11. Яцко, Ф. В. Довговічність захисного шару залізобетонних елементів мостів [Текст] / Ф. В. Яцко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – № 34. – С. 154–158.
12. Яцко, Ф. В. Практична інженерна методика оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів в процесі проектування [Текст] / Ф.В. Яцко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – № 25. – С. 138–147.
13. Durability design of concrete structures – RILEM Report 14 / Edited by A. Sarja and E. Vesikari. – London : Taylor & Francis, 1996. – 93 p.
14. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings / European Committee for Standardization. – Brussels : European Committee for Standardization, 2004. – 225 p.
15. Folic R. Durability design of concrete structures – Part 1: Analysis fundamentals [Text] / R. Folic // Facta Universitatis - Series: Architecture and Civil Engineering. – 2009. – Vol. 7, No 1. – P. 1-18.
16. General principles on reliability for structures. ISO 2394:1998 / Geneva : International Organization for Standardization, 1998. – 73 p.
17. Report of RILEM Technical committee 130-CSL [Durability design of concrete structures]. Edited by A.Sarja and E.Vesicary. E&SPON.

Ф. В. ЯЦКО*

* Кафедра «Мосты и тоннели», Национальный транспортный университет, ул. Суворова 1, Киев, Украина, 01010, тел. + 38 044 280 79 78, эл. почта fedor.yatsko@gmail.com

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОСТОВ В АВТОМАТИЗОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Цель. Научный поиск модели прогноза жизненного цикла элементов автодорожных мостов для интеграции в САПР. **Методика.** Теоретическое изыскания. **Результаты.** Доказана принципиальная возможность использования разработанной модели прогноза ресурса при автоматизированном проектировании железобетонных изгибаемых элементов на заданный срок службы. **Научная новизна.** Предлагается модель, предназначенная для прогнозирования ресурса элемента на всех этапах жизненного цикла, начиная с проектирования. **Практическая значимость.** Предложено практическую методику оценки ресурса железобетонных элементов мостов в процессе автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: деградация защитного слоя; коррозия арматуры; ресурс; жизненный цикл; характеристика безопасности

F. V. YATSKO*

* Dept. of Bridges and Tunnels, National Transport University, 1 Suvorov str., Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 044 280 79 78, e-mail fedor.yatsko@gmail.com

SERVICE LIFE PREDICTION METHODOLOGY OF CONCRETE BENDING ELEMENTS OF ROAD BRIDGES IN AUTOMATED DESIGN

Purpose. Scientific research of life cycle prediction model of road bridges for CAD usage. **Methodology.** Theoretical study. **Findings.** The principal possibility of using the lifetime prediction model for reinforced concrete elements when designing using CAD for the specified service life. **Originality.** The lifetime prediction model for reinforced concrete elements for the specified service life at all stages of the life cycle, starting from the design is proposed. **Practical value.** A practical engineering service life evaluation technique for reinforced concrete bridge elements in the CAD design process.

Keywords: degradation of the protective layer, corrosion of reinforcement, service life, reliability factor

REFERENCES

1. Blikharskiy Z. Ja., Stashuk M. Gh., Malyk O. M. Modeljuvannja korozijnnykh rujnuvanj zalizobetonnykh balok v aghresyvnomu seredovyshhi [Simulation of corrosion damage of reinforced concrete beams in hostile environments]. *Zakhyst vid koroziji i monitoryng zalyskovogho resursu promyslovykh budivelj, sporud ta inzhenernykh merezh – Corrosion protection and monitoring of the residual life of industrial buildings, facilities and utilities*, 2003, issue 6, pp. 48-55.
2. Bondarenko V. M., Bondarenko S. V. *Inzhenernye metody nelineynoy teorii zhelezobetona* [Engineering methods of nonlinear theory of reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 210 p.
3. VBN V.3.1-218-174-2002. *Mosty ta truby. Ocinka tekhnichnogho stanu mostiv, shho ekspluatujutsja* [Bridges and pipes. Evaluation of the technical state of bridges operated]. Kyiv : Derzhavna sluzhba avtomobilnykh dorog Ukrainy Publ., 2001. 74 p.
4. DBN V.1.2-14-2009. *Systema zabezpechennja nadijnosti ta bezpeky budivelnix ob'ektiv. Zagalni pryncypy zabezpechennja nadijnosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel, sporud, budivelnix konstrukcij ta osnov* [State Standard V.1.2-14-2009 System reliability and safety of construction projects. General principles of reliability and structural safety of buildings, structures and foundations]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2009. 36 p.
5. DSTU-N B.V.2.3-23-2013. *Sporudy transportu. Nastanova z otsynuvannja i prognozuvannja tehničnogo stanu avtodorozhnyh mostiv* [State Standard B.V.2.3-23-2013. Transport constructions. Guidance evaluation and forecasting technical condition of road bridges]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2013. 49 p.
6. Lantukh-Lyashchenko A. I. O prognoze ostatochnogo resursa mosta [On the forecast residual life of the bridge]. *Doroghy i mosty – Road and Bridge*, 2007, issue 7, vol. 2. pp. 3-9.
7. Lantukh-Lyashchenko A. I. Ocinka nadijnosti sporudy za modellju markovskogho vypadkovogho procesu z dyskretnymy stanamy [Evaluation of reliability built on the model of Markov random process with discrete states]. *Avtomobilni doroghy i dorozhnye budivnytvo – Roads and road construction*, 1999, issue 57, pp. 183-188.
8. DSTU-N B EN 1990:2008. *Jevrokod. Osnovy proektuvannja konstrukcij* (EN 1990:2002, IDT) [Eurocode. Basis of structural design]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy, 2012. 116 p.
9. Perelmuter A. V. *Izbrannye problemy nadezhnosti i bezopasnosti stroitelnykh konstruktsiy* [Selected problems of constructions reliability and safety]. Moscow, Izdatelstvo assotsiatsii stroitelnykh vuzov Publ., 2007. 185 p.
10. Redchenko V. P. Monitoryng tekhnichnogho stanu mostiv metodamy pasyvnoyi vibracijnoyi diagnostyky [Monitoring technical condition of bridges passive vibration diagnostics methods]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 33, pp. 223-227.
11. Jacko F. V. Dovghovichnistj zakhysnogo sharu zalizobetonnykh elementiv mostiv [The durability of the protective layer of concrete elements bridge]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, no. 34, pp. 154-158.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

12. Jacko F. V. Praktychna inzhenerna metodyka ocinky resursu zalizobetonnykh elementiv mostiv v procesi proektuvannja [Practical engineering method of estimating resource concrete elements in the design of bridges]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2014, no. 25, pp. 138–147.
13. *Durability design of concrete structures* – RILEM Report 14 / Edited by A. Sarja and E. Vesikari. London, Taylor & Francis Publ., 1996. 93 p.
14. EN 1992-1-1: Eurocode 2: *Design of concrete structures* – Part 1-1: General rules and rules for buildings / European Committee for Standardization. Brussels, European Committee for Standardization Publ., 2004. 225 p.
15. Folic R. *Durability design of concrete structures* – Part 1: Analysis fundamentals. Facta Universitatis. Series, Architecture and Civil Engineering Publ., 2009, issue 7, No 1, pp. 1-18.
16. *General principles on reliability for structures*. ISO 2394:1998. Geneva, International Organization for Standardization Publ., 1998. 73 p.
17. *Report of RILEM Technical committee 130-CSL* [Durability design of concrete structures]. Edited by A. Sarja and E. Vesicary. E&SPON.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. І. Лантух-Лященко (Україна), д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна).

Надійшла до редколегії 26.11.2016.

Прийнята до друку 26.12.2016.

Наукове видання

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

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

Випуск 10

(українською, російською та англійською мовами)

*Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
КВ № 17811-6661Р від 27.04.2011 р. видане Міністерством юстиції України*

Відповідальний за випуск *В. Д. Петренко*
Комп'ютерне верстання *В. І. Соломка*

Статті в збірнику друкуються в авторській редакції

Формат 60 × 84 ¹/₈. Ум.друк.арк. 14,53. Тираж 100 пр. Зам. № ____.

**Дніпропетровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна**

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ-10, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 233-58-12

E-mail: kafmost@mt.diit.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003.

