

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ АРОЧНОГО КАМ'ЯНОГО МОСТА ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Коваль П.М., к.т.н., професор,
Стоянович С.В., к.т.н., ст. викладач,
Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, Київ
koval_pm@meta.ua

Оксень Є.І., д.т.н., професор,
ДП «Державний дорожній науково-дослідний інститут», Київ

Анотація. Приведені результати досліджень конструкцій кам'яного моста після тривалої експлуатації. Були виявлені дефекти конструкцій моста, що знижують його надійність та довговічність. Для оцінки ступеня небезпеки дефектів, швидкості їх росту, а також прогнозування їх подальшого розвитку були застосовані сучасні методи діагностики. Визначено вплив технічного стану прогонових будов моста на частоту їх власних коливань під час проїзду автомобілів. Виконано чисельне моделювання процесу завантаження прогонової будови колесом транспортного засобу та визначені причини формування повздожніх тріщин в прогонах моста.

Ключові слова: кам'яний міст, прогонова будова, енергія випромінювання, надійність, довговічність.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ АРОЧНОГО КАМЕННОГО МОСТА ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Коваль П.Н., к.т.н., профессор,
Стоянович С.В., к.т.н., ст. преподаватель,
Национальная академия изобразительного искусства и архитектуры, Киев
koval_pm@meta.ua

Оксень Е.И., д.т.н., профессор,
ДП «Государственный дорожный научно-исследовательский институт», Киев

Аннотация. Приведены результаты исследований конструкций каменного моста после длительной эксплуатации. Были обнаружены дефекты конструкций моста, что снижают его надежность и долговечность. Для оценки степени опасности дефектов, скорости их роста, а также прогнозирования их дальнейшего развития были применены современные методы диагностики. Определено влияние технического состояния пролетных строений моста на частоту их собственных колебаний при проезде автомобилей. Выполнено численное моделирование процесса загрузки пролетного строения колесом транспортного средства и определены причины формирования продольных трещин в пролетах моста.

Ключевые слова: каменный мост, пролетное строение, энергия излучения, надежность, долговечность.

RESEARCH AND EVALUATION OF THE ARCH STONE BRIDGE STRUCTURE STATE AFTER LONG-TERM OPERATION

Koval P.M., PhD, Professor,
Stoyanovich S.V., PhD, Senior Lecturer,

Oksen E.I., Doctor of Engineering, Professor,
SE "State Road Research Institute", Kiev

Abstract. The results of the stone bridge structure investigation after long-term operation are presented. The defects of the bridge structures that reduce their reliability and durability were found. Modern methods of diagnostics were applied to assess the risk level of defects, rate of their growth and prediction of their future propagation. The impact of the technical state of the bridge spans on the frequency of their natural oscillations at the vehicles driving was determined. The cross-country running of heavy goods vehicles produces the biggest impact on the destruction of the bridge structure. The numerical simulation of the process of the bridge span loading by the wheel of the vehicle was carried out and the causes of longitudinal cracks formation in the bridge spans were identified. For the safe operation of the bridge, the weight of vehicles is limited to 8 tons and the need for the overhaul involving the strengthening of defective bearing structures was determined.

Keywords: stone bridge, span, energy radiation, reliability, durability.

Вступ. Мости із каменю дивують своєю довговічністю – деякі з них експлуатуються більше двох тисяч років. Вимога до довговічності металевих і залізобетонних мостів у нормативних документах України встановлена у 100 років. У нашій країні є ряд кам'яних мостів, які служать людям більше ніж 100 років. Зведення кам'яних мостів потребує значних затрат ручної праці висококваліфікованих робітників і не піддається механізації, тому вже багато десятиліть кам'яні мости не будуються. На дорогах України кам'яних мостів залишилося небагато, тому важливим завданням є збереження цих унікальних споруд.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Кам'яним мостам та проблемі їх збереження в останні роки присвячено ряд робіт, але вони переважно подають історію їх створення, дані про конструкції та зовнішній вигляд. Так у роботі [1] приведено опис ряду найстаріших кам'яних мостів України – Старого Австрійського у селищі Ворохта, Генуезького у м. Феодосія, Замкового у м. Кам'янець-Подільському. Обмеженість наведеної в цій роботі інформації та відсутність висновків щодо стану та збереження цих мостів свідчать про поверхове розкриття проблеми, яку розглядав автор.

Інформацію про розвиток конструкцій кам'яних мостів, їх використання у мостобудуванні у різні періоди транспортного будівництва викладено у роботі [2].

Узагальнення багаторічної роботи щодо досвіду експлуатації, оцінки технічного стану, підсилення кам'яних мостів представлено в роботі [3]. Це ґрунтовне дослідження, в якому приведено детальний опис ряду мостів із каменю, розглянуто три періоди будівництва кам'яних мостів. На конкретному об'єкті представлено аналіз технічного стану моста, дослідження матеріалів кладки споруди, пропозиції із технічних рішень ремонту моста, науково-технічного супроводу робіт з ремонту споруди. Позитивним враженням є оптимізм автора професора Шестерикова В.І. щодо відновлення будівництва кам'яних мостів.

В роботі [4] розроблена методика дослідження матеріалів кладки кам'яних арок мостів. Розроблені автором підходи щодо визначення надійності та наближений метод перевірки несної здатності арок мостів можна використовувати для кам'яних мостів.

Незважаючи на те, що мости із кам'яної кладки відомі тисячі років, робота таких конструкцій вимагає досліджень із застосуванням сучасних теоретичних методів. В роботах таких авторів як I. Stefanou, K. Sab, J. Dellot, G. Milani та інших [5-8] досліджено напружено-деформований стан криволінійних кам'яних конструкцій, розроблені методи прогнозування руйнуючого навантаження для кам'яних конструкцій, розроблені методи прогнозування руйнуючого навантаження для кам'яних конструкцій різної конфігурації, з використанням моделювання розв'язані складні задачі розрахунку склепін із кам'яної кладки.

Використання методу скінчених елементів для розрахунку кам'яних арок пропонується

в роботі [9]. Автори вважають, що алгоритм запропонованої ними моделі дає можливість отримати високу точність при мінімальній кількості операцій. Важливим висновком роботи є те, що в Російських нормах критерії міцності і стійкості в ряді випадків недостатньо задовільні для кам'яних арок і тому їх варто переглянути.

Метою досліджень є встановлення технічного стану кам'яного моста та визначення можливості його подальшої експлуатації

Опис конструкцій моста. Існуючий міст через канал Верке розташований в м. Берегове на автодорозі М-23 Берегове – Виноградів – В. Копаня, км 0+030 (рис. 1).

В архівах міста Берегове є документ, де вказано, що міський голова Андришич уклав письмову угоду з італійським майстром Янушом Петрушкою, котрий і побудував міст у 1850-1853 роках у готичному стилі. Це один з найдавніших збережених мостів України. Міст реконструювали в 1928 та 1985 роках.



Рис. 1. Загальний вигляд моста

Технічні параметри моста: загальна довжина моста – 43,6 м; габарит проїзної частини Г-7,0 з тротуарами 2×1,5 м; статична схема моста – арочна чотирипрогонова; геометрична схема моста 8,5+2×8,9+8,5 (між внутрішніми гранями опор); арочні прогони у вигляді склепіння з каменю; по боках над склепіннями стінки з каменю, проміжні і берегові опори – масивні з кам'яної кладки.

Результати дослідження несних конструкцій моста. Внаслідок погіршення технічного стану моста виникла необхідність у проведенні досліджень його несних конструкцій для визначення їх фактичних характеристик міцності і деформативності, вантажопідйомності та призначення режиму експлуатації споруди відповідно до [10].

В результаті обстеження моста проведеного у 2016 році були виявлені дефекти конструкцій, що знижують надійність споруди та її довговічність, а також дефекти, що знижують вантажопідйомність елементів моста: значні деформації покриття проїзної частини моста; тріщини в склепіннях арок прогонових будов та опор моста, що з кожним роком мають тенденцію до збільшення ширини розкриття та кількості (порівняно з результатами попередніх обстежень, що були проведені у 2003 р); вивітрювання облицювання, викришування розшивки швів кладки склепінь, замокання кладки склепінь арок; вилуговування та руйнування розчину кладки, внаслідок руйнування або відсутності гідроізоляції; вимивання та випадання окремих каменів кладки опор та склепінь прогонових будов; замуленість русла каналу в перспективі зменшення пропускної здатності отвору мосту, що, в свою чергу, може спричинити пошкодження конструкцій опор.

На рис. 2 наведені найбільш небезпечні дефекти, що впливають на несну здатність конструкцій моста та знижують вантажопідйомність його елементів.

Для оцінки ступеня небезпеки дефектів, швидкості їх росту, а також прогнозування їх подальшого розвитку був застосований крім традиційних методів діагностики і сучасний метод віброакустичної емісії.

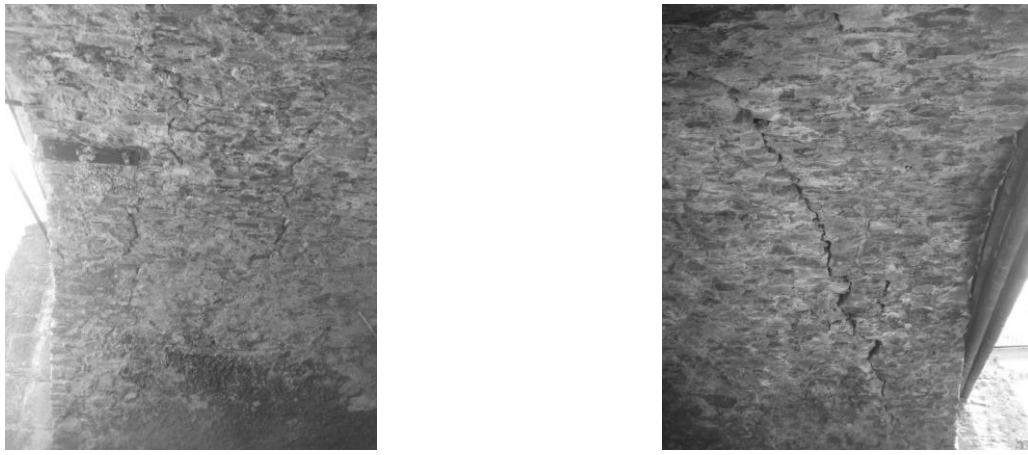
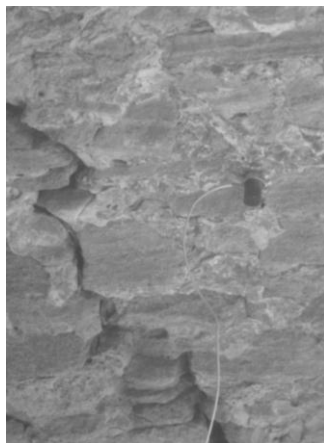


Рис. 2. Поздовжні тріщини в склепінні арки, замокання кладки, вилуговування та руйнування розчину кладки

Дослідження моста проводили під час руху транспортних засобів по споруді. Для проведення динамічних досліджень моста застосовувалось експериментальне обладнання віддаленого моніторингу прогонових будов мостів за сигналами віброакустичної емісії. Визначили вплив технічного стану прогонових будов моста на частоту їх власних коливань. Динамічне навантаження створювалось реальним рухом транспортних засобів. Для реєстрації та аналізу динамічних характеристик прогонової будови моста використовувались перетворювачі віброакустичної емісії (ПВАЕ) (рис. 3, а) типу MMA7341L – MEMS (мікроелектронна механічна система), що на виході формують аналоговий сигнал по напрузі пропорційний прискоренню точки його кріплення. Реєстрація віброакустичних сигналів здійснювалось в цифровому вигляді з застосуванням зовнішнього модуля аналогово-цифрового перетворення ADA-1406 та ноутбука (рис. 3, б) з частотою опитування 40000 Гц на кожний з каналів, що надає можливість розкриття проявів сигналів з частотою до 20000 Гц.

Під час досліджень здійснювалась реєстрація вібраційного (низькочастотного) та акустичного (високочастотного) сигналів, що утворюються в конструкції прогонової будови внаслідок динамічного навантаження від реального експлуатаційного руху транспортних засобів.



а)

б)

Рис. 3. Обладнання для проведення випробувань прогонової будови моста: а – розташування перетворювачів ПВАЕ на нижній поверхні склепіння арки; б – обладнання для реєстрації віброакустичних сигналів

Застосування обладнання моніторингу прогонових будов за сигналами віброакустичної емісії дозволило здійснити кількісну оцінку стану моста та встановити рівень руйнування кам'яної кладки під дією навантажень від руху транспортних засобів.

Проведенні спостереження проявів динамічного навантаження від автомобілів не виявили проявів низькочастотних коливань прогонової будови, а саме, суттєвих коливань з частотою менш ніж 40 Гц. В той самий час, при проїзді транспортних засобів зафіксовано випромінювання енергії акустичного спектру в діапазоні 100-20000 Гц. Діаграми енергії акустичної емісії (АЕ) від руйнування відповідно до виду навантаження від рухомого транспорту наведено на рис. 4 у вигляді діаграм надходження енергії (Signal AE) та накопичувальних діаграм енергії (Energy AE).

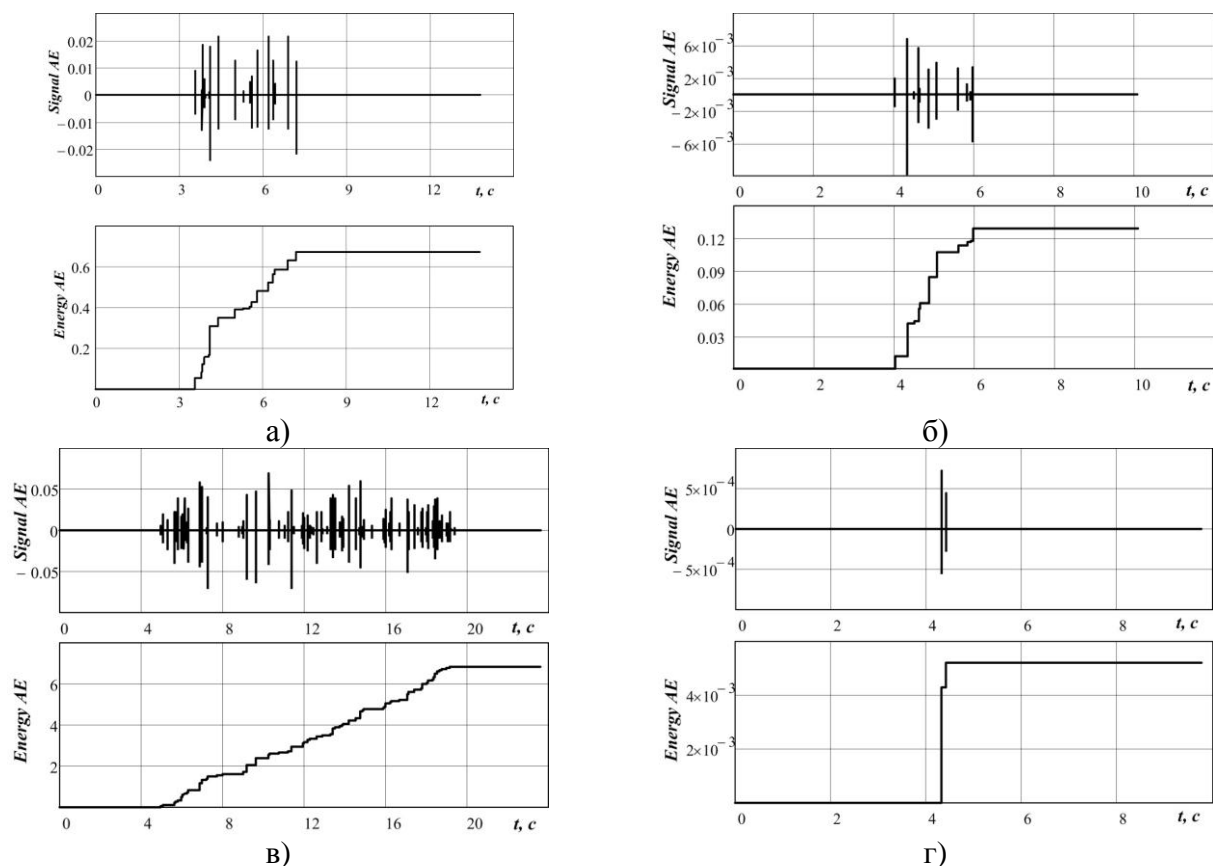


Рис. 4. Діаграми надходження енергії (Signal AE) та накопичувальні діаграми енергії (Energy AE) акустичної емісії (АЕ) від руйнування відповідно до виду навантаження від рухомого транспорту:

а – проїзд з зупинкою сідельного тягача з напівприцепом марки Iveco; б – проїзд вантажного автомобіля марки Mercedes Atego; в – проїзд з зупинкою сідельного тягача з напівприцепом марки MAN; г – проїзд легкового автомобіля марки Chevrolet Aveo

Значення енергії випромінювання АЕ відповідно до кожного з варіантів динамічних навантажень наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення енергії випромінювання АЕ

№	Тип навантаження	Загальна енергія АЕ, $\text{м} \times \text{с} / \text{с}^2$	Відносна енергія руйнування
1	Проїзд сідельного тягача з напівприцепом марки Iveco	1,684E-05	129,4
2	Проїзд вантажного автомобіля марки Mercedes Atego	3,229E-06	24,8
3	Проїзд з зупинкою сідельного тягача з напівприцепом марки MAN	1,714E-04	1316,0
4	Проїзд легкового автомобіля марки Chevrolet Aveo	1,302E-07	1,0

Результати досліджень методом віброакустичної емісії свідчать, що:

– рух саме великовантажних автомобілів спричиняє найбільше руйнування для конструкції склепіння арок моста;

– проїзд легкового автомобіля для технічного стану, в якому знаходяться конструкції прогонових будов моста, також викликає розвиток дефектів, але загальна енергія випромінювання АЕ в цьому випадку в 20-100 разів менша ніж при проїзді вантажних автомобілів.

Для з'ясування причин формування повздовжніх тріщин в прогонах моста було виконано чисельне моделювання процесу завантаження фрагменту прогонової будови одиничним колесом транспортного засобу відповідно до [11, 12]. В якості математичної моделі у зв'язку з симетрією конструкції була прийнята кінцево-елементна модель в одній чверті прогону моста (рис. 5).

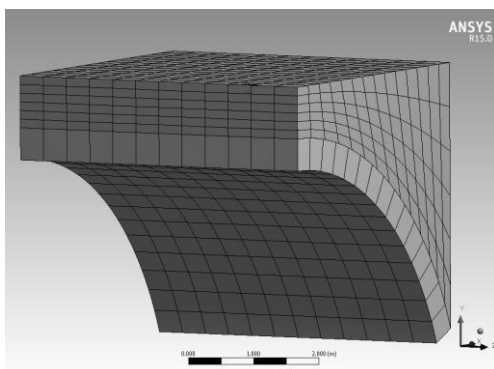


Рис. 5. Кінцево-елементна модель склепіння арки моста

Розрахунки були виконані для двох значень розрахункових навантажень: навантаження на колесо 60 кН та 25 кН.

Результати розрахунків представлені у вигляді діаграм нормальних та дотичних напруг в конструкції аромного прогону (рис. 6).

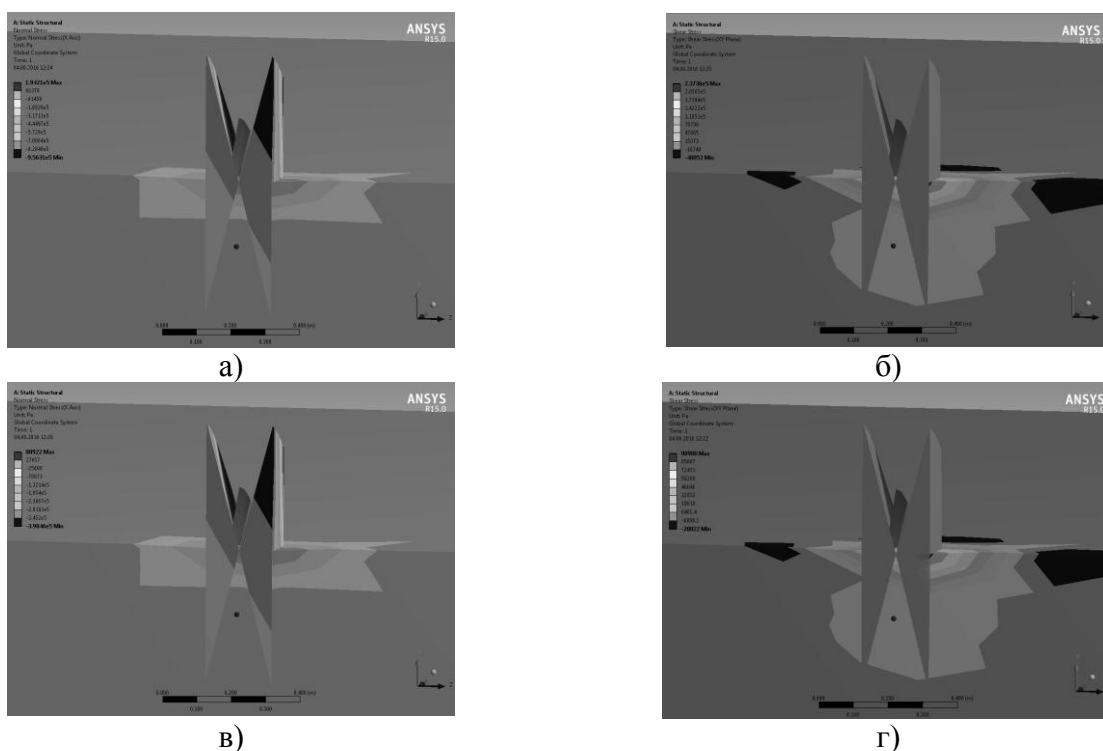


Рис. 6. Діаграми нормальних та дотичних напруг в конструкції аромного прогону: а – розподіл нормальних напружень – навантаження на колесо 60 кН; б – розподіл дотичних напружень – навантаження на колесо 60 кН; в – розподіл нормальних напружень – навантаження на колесо 25 кН; г – розподіл дотичних – навантаження на колесо 25 кН

Як свідчать результати розрахунків від навантажень в конструкції виникають напруження розтягу. Саме розвиток таких напружень розтягу в поперечному напрямку при дії навантаження від коліс автомобілів спричиняє розвиток повздовжніх тріщин в конструкції склепіння арки. Оскільки співвідношення між навантаженнями та максимальними напруженнями розтягу в перерізах вказує на прямо пропорційну залежність між ними, а міцність вапнякових розчинів, що були застосовані при будівництві моста, на розтяг досить невелика, тому проїзд великовагових автомобілів призвів до швидкого руйнування конструкцій моста.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами досліджень конструкцій моста було встановлено незадовільний їх стан. Визначено, що дефекти конструкцій моста знижують його вантажопідйомність та довговічність. Найбільше руйнування конструкцій моста спричиняє рух великовантажних автомобілів. Тому для безпечної експлуатації моста обмежено вагу транспортних засобів до 8 т і визначено необхідність у капітальному ремонті дефектних конструкцій моста. В подальшому треба розробити ефективну конструкцію підсилення моста із збереженням історичного вигляду споруди та провести порівняльний аналіз роботи несних конструкцій моста до та після їх підсилення.

Література

1. Константинов В.О. Дерев'яні та кам'яні мости України – пам'ятки науки і техніки / В.О. Константинов // Дослідження з історії техніки. – 2014. – Випуск 20. – С. 18-22.
2. Мости: конструкції та надійність / Лучко Й.Й., Коваль П.М., Корнієв М.М. [та ін.] – Львів: Каменяр, 2005. – 989 с.
3. Автомобильные дороги и мосты. Каменные мосты России (Федеральные автомобильные дороги). Обзорная информация. – Москва, 2004. – Выпуск 7. – 88 с.
4. Золтан Орбан. Исследование и диагностика технического состояния мостов арочной конструкции: диссертация кандидата техн. наук: 05.13.01, 05.11.13 / Орбан Золтан. – Москва, 2009. – 125 с.
5. Stefanou I. Three dimensional homogenization of masonry structures with building blocks of finite strength: A closed form strength domain / I. Stefanou, K. Sab, J.-V. Heck // International Journal of Solids and Structures, 2015. – 54. – P. 258-270.
6. Dallot J. Experimental validation of a homogenized plate model for the yield design of masonry walls / J. Dallot, K. Sab, O. Godet // Comptes Rendus Mécanique, 2008. – 336. – P. 487-492.
7. Milani G. A simple meso-macro model based on SQP for the non-linear analysis of masonry double curvature structures / G. Milani, A. Tralli // International Journal of Solids and Structures, 2012. – 49. – P. 808-834.
8. Assessment of curved FRP-reinforced masonry prisms: Experiments and modeling / I. Basilio, R. Fedele, P. B. Lourenzo, G. Milani // Construction and Building Materials, 2014. – 51. – P. 492-505.
9. Зимин С.С. Расчетная модель каменной арочной конструкции / С.С. Зимин, В.В. Беспалов, А.С. Казмирова // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Будівлі і споруди із застосуванням нових матеріалів і технологій. – Випуск 2015 – 3(113). – С. 33-37.
10. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування: ДБН В.2.3-6:2009. – [Чинний від 2006-03-01] – Держбуд України, 2009. – 54 с.
11. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування: ДБН В.2.3-14:2006. – [Чинний від 2006-05-06] – Держбуд України, 2006. – 356 с.
12. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження та впливи: ДБН В.1.2-15:2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 67 с.

Стаття надійшла 8.11.2017