

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБ ПІДСИЛЕНИХ МЕТАЛЕВОЮ ГОФРОВАНОЮ ТРУБОЮ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ ІЗ ҐРУНТОВОЮ ЗАСИПКОЮ

Ковальчук В. В.

Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна

Проблема та її актуальність. Останнім часом відбувається прогресуюче погіршення стану малих і середніх мостів та водопропускних труб, в тому числі побудованих і за типовими проектами. Це зумовлено впливом навколишнього середовища, фізичним зносом і старінням матеріалів і конструкцій, зростаючими обсягами залізничних та автомобільних перевезень, підвищенням осьових навантажень та швидкостей руху транспорту. Виникаючі у процесі експлуатації дефекти транспортних споруд потребують ремонтних заходів.

Так, за даними Укрзалізниці, станом на 01.01.2012 р. на її залізницях експлуатується 10940 водопропускних труб із яких 259 дефектних. За даними служби автомобільних доріг України (Укравтодору) в її експлуатації знаходиться 129053 водопропускних труби з яких 37425 є дефектними [1–2]. Якщо брати тільки труби, то, в середньому 29 % із цих труб вимагають ремонтних заходів. Зважаючи на те, що за останніх 5 років виконувався ремонт не в достатній мірі, то відсоток труб, які потребують ремонтних заходів ще збільшився.

Одним із перспективних заходів ремонту дефектних труб є ремонт дефектних залізобетонних труб із застосування металевих гофрованих конструкцій [3–9]. Суть цього методу полягає у тому, що у внутрішню частину існуючого об'єкта конструкції, або труби вводиться труба із гофрованого металу, а потім у заповненні простору між існуючим об'єктом і стінкою конструкції, або труби з гофрованих листів бетоном (розчином). Метод дозволяє відремонтувати існуючий об'єкт без припинення руху й виключає необхідність його розкладання.

Труби розраховують на постійні навантаження від ваги ґрунту насипу і на тимчасове вертикальне рухоме навантаження, розташоване на насипі. Обидва ці навантаження, передаючись через насип, викликають вертикальний і горизонтальний тиск на ланки труби. Схеми навантаження на трубу та розрахункові схеми наведені на рис 1. [10].

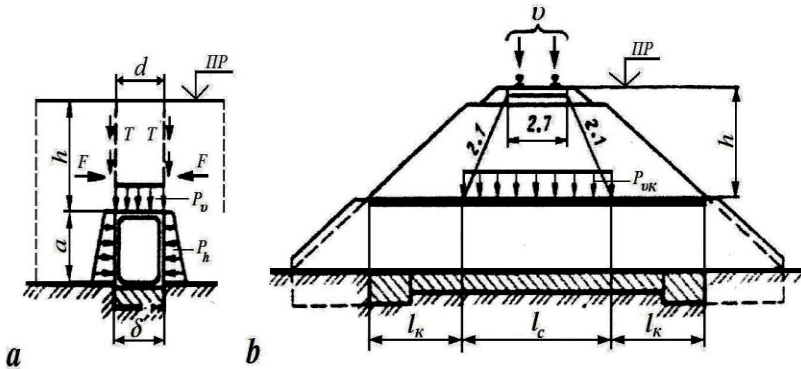


Рис. 1. Схема навантажень на трубу: *a* – тиск власної ваги насипу; *b* – тиск тимчасового рухомого навантаження

Вертикальний тиск на трубу від постійного навантаження визначають із врахуванням сил тертя, які діють на вертикальні площини, що обмежують стовп насипу під трубою (див. рис. 1). Ці сили тертя виникають унаслідок того, що осідання насипу (у перший період після його відсіпання) над трубою менше, ніж на ділянках поряд з трубою; різниця осідання досягає максимального значення на рівні верху труби, а на рівні поїзда вона значно менша, особливо при високих насипах.

Сили тертя F , що діють на стовп насипу над трубою, направлені вниз, оскільки ділянки насипу із боків труби, розташовані поряд із стовпом який ми розглядаємо, будуть спускатися. Величину сил тертя можна визначити, помноживши сили нормального тиску на граничні площини і на коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту насипу. Тому тиск ґрунту насипу на трубу виявляється більшим за вагу стовпа ґрунту, розташованого над трубою.

Величину вертикального рівномірно розподіленого тиску на трубу (у МПа) визначають за формулою:

$$P = C\gamma_n H, \quad (1)$$

де $C > 1$ – безрозмірний коефіцієнт, який враховує сили тертя; γ_n – об'ємна вага насипу ґрунту, т/м^3 ; H – висота стовпа ґрунту від верху труби до підшви шпали, або до верху дорожнього покриття, м.

Величину коефіцієнта C визначають із наступних міркувань. Сила тертя по одній із площин, віднесена до 1 м^2 горизонтальної проекції труби шириною D рівна:

$$F = \frac{E}{D} \text{tg}(\varphi_n), \quad (2)$$

де $E = \frac{1}{2} \gamma_n H^2 \mu$ – активний тиск ґрунту на 1 п. м довжини площини, яка обмежує стовп ґрунту над трубою;

$$\mu = tg^2 (45 - \varphi_n / 2),$$

де φ_n – нормативний кут внутрішнього тертя ґрунту.

Значення γ_n і φ_n , як правило, приймаються на підставі лабораторних досліджень зразків ґрунтів, що призначені для засипки споруди. При типовому проектуванні для визначення характеристичного тиску ґрунту припускається приймати щільність ґрунту засипки $\gamma_n = 17,7$ кН/м³ (1,80 тс/м³), характеристичні кути внутрішнього тертя φ_n слід приймати: для стоянів при засипанні піщаним (дренувальним) ґрунтом $\varphi_n = 35^\circ$; для ланок труб, що знаходяться у насипу, $\varphi_n = 30^\circ$; для оголовків труб $\varphi_n = 25^\circ$.

Сума сил тертя по двох площинах над трубою, буде рівною:

$$2F = \frac{2E}{D} tg \varphi_n = \frac{\gamma_n}{D} H^2 \mu tg \varphi_n. \quad (3)$$

Тому, застосовуючи формулу (3) визначаємо коефіцієнт C для невисокого насипу:

$$\tilde{N} = 1 + \frac{H}{D} \mu tg \varphi_n = 1 + A \mu tg \varphi_n. \quad (4)$$

При високому насипу, коли на деякій висоті осідання над трубою і по боках труби вирівнюються, можна одержати на основі аналогічних міркувань уточнене значення величини

$$A = \frac{Sh}{H} \left(2 - \frac{SDn}{H^2} \right), \quad (5)$$

де h – висота труби, м; S – коефіцієнт відносної жорсткості основи, рівний 15 при скельній, або пальовій основі, 10 – при основі із щільних пісків, твердих і туго пластичних глин і суглинків і 5 при основі із рудих пісків, м'яко-пластичних суглинків і глин.

При доброму ущільненні насипу в час його відсіпки вертикальний тиск на трубу зменшується внаслідок меншої величини осідання. У цьому випадку для труб під автодорогами дозволяється знижувати коефіцієнт C на 30%. При $Sh/H \geq H/D$ потрібно приймати $A = H/D$.

Горизонтальний постійний тиск ґрунту насипу на трубу (МПа) визначають за формулою:

$$e_p = \mu \gamma_n \cdot H', \quad (6)$$

де $H' = H$ для круглих труб і $H' = H + h/2$ для прямокутних труб.

Тимчасове вертикальне навантаження, розташоване на насипі, також викликає вертикальний і горизонтальний тиск ґрунту на трубу (див. рис. 1). Воно розподіляється у насипі під кутом, рівним $\arctg 1/2$ до вертикалі. Приймаючи навантаження від залізничного рухомого складу, рівного $2K$ (для навантаження С14 – 28 т/мп колії) і що довжина шпал, через які навантаження розподіляється впоперек вісі колії, рівна 2,7 м, одержимо вертикальний тиск на трубу (т/м²)

$$q = \frac{2K}{2,7+H} = \frac{28}{2,7+H}. \quad (7)$$

Для труб під автомобільні дороги тиск (1 т/м²) від рухомого навантаження НК-80 можна визначити за формулою

$$q = \frac{19}{H+3}. \quad (8)$$

Якщо висота засипки над трубою менше 1 м, розглядають фактичний тиск на трубу від коліс навантаження НК-100, або НК-80 з врахуванням його розподілу покриттям і насипом.

Горизонтальний тиск також визначають множенням вертикального тиску на μ :

$$e_q = \mu \cdot q, \quad (9)$$

де q – визначається для висоти $H' = H$ для круглих труб і $H' = H + h/2$ для прямокутних труб.

Відхилення навантаження від нормативного враховують множенням величини тисків p , e_p , q , e_q на коефіцієнти перевантаження, а відхилення від нормативного кута внутрішнього тертя враховують, приймаючи його на 5° вище, або нижче за нормативний у невигідну для розрахунку конструкції труби сторону.

Ланки круглих труб розраховують, як кільця, що працюють в умовах нерівномірного радіального стиску. Найбільші розрахункові згинальні моменти у такому кільці у вертикальних і горизонтальних перерізах (без врахування нормальних і поперечних сил) визначають за формулою:

$$M_{\text{вс}} = \pm \nu r^2 (n_p P + n_t q) (1 - \mu). \quad (10)$$

Тут враховується вплив постійних тисків p і e_p і тимчасових P і e_q ; n_p і n_t – коефіцієнт перевантаження; μ – нормативний кут внутрішнього тертя $\pm 5^\circ$; r – радіус кільця труби для середини товщини ланки; $\nu \geq 0,2$ – коефіцієнт, який враховує умови обпирання ланки: для ла-

нок, укладених на фундаменті, $\nu = 0,22$; на ґрунтову основу – $\nu = 0,25$.

За цими значеннями згинальних моментів визначають товщину кільця при його нормуванні із умови недопущення тріщин у бетоні.

Вихідні дані. Для дослідження величин горизонтальних та вертикальних тисків на трубу були вибрані наступні вихідні дані: висота засипки змінювалася від 1 м до 3 м, величина діаметру труби – 2 м; величина щільності ґрунту засипки $\gamma_n = 17.7 \text{ кН/м}^3$; кут внутрішнього тертя ґрунту – $\phi_n = 30^\circ$; коефіцієнт відносної жорсткості основи $S = 1,0$. Для врахування динамічних властивостей від рухомого складу залізниць було прийнято навантаження від залізничного рухомого складу, рівного $2K$ (для навантаження С14 – 28 т/мп колії) при довжині шпал, через які навантаження розподіляється впоперек вісі колії, рівна 2,7 м

Для розрахунку сил тиску на трубу була розроблена програма у програмному пакеті Mathcad 14. Результати розрахунку величин горизонтального та вертикального тисків ґрунту від постійного навантаження ґруту засипки наведені на рис.2, а від рухомого складу залізниць на рис.3.

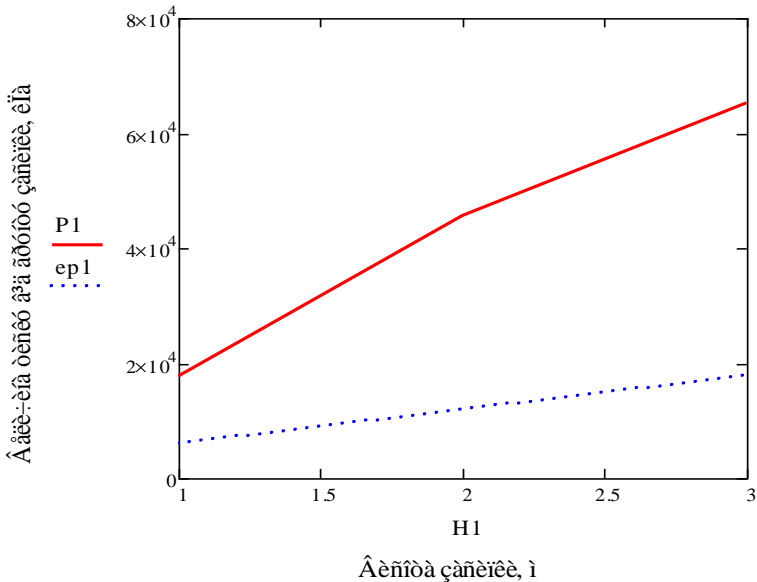


Рис. 2. Величини вертикального та горизонтального тисків на трубу від постійних навантажень

Із рис.2 видно, що величина, як вертикального так і горизонтального тисків на залізобетонну трубу, яка підсилена металевою гофрованою трубою, при збільшенні висоти засипки ґрунту над нею – збільшується. Так при висоті засипки над трубою 1 м, величина вертикального тиску від постійного навантаження ґрунту становить – 17,7 кПа, а горизонтального – 5,9 кПа, при 2 м величина вертикального тиску ґрунту – 45,62 кПа, горизонтального – 11,8 кПа, при 3 м величина вертикального тиску ґрунту – 65,21, а горизонтального – 17,7 кПа.

Із рис.3 можна зробити висновок, що величина, як вертикального так і горизонтального тисків, на залізобетонну трубу, які виникають від дії рухомого складу при збільшенні висоти засипки зменшується, що пов'язано із розсіянням енергії у товщі ґрунту. При висоті засипки над трубою 1 м величина вертикального тиску від навантаження С14 становить – 7,568 кПа, а горизонтального – 2,523 кПа, при 2 м величина вертикального тиску ґрунту – 5,957 кПа, горизонтального – 1,986 кПа, при 3 м величина вертикального тиску ґрунту – 4,912 кПа, а горизонтального – 1,637 кПа.

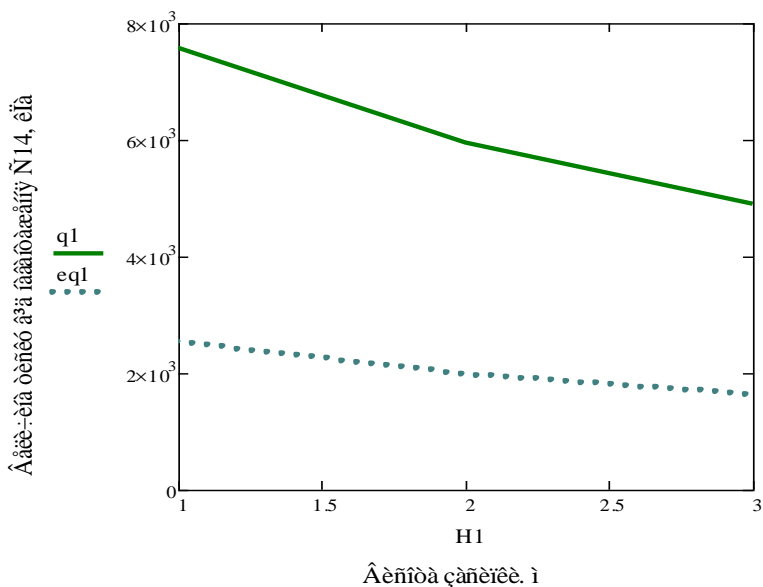


Рис. 3. Величини вертикального та горизонтального тисків на трубу від рухомого складу залізниць

Напружено-деформований стан залізобетонної труби, яка підсилена металевим гофрованою конструкцією. Числові дослідження напружено-деформованого стану проведемо при наступних геометричних параметрах залізобетонної труби: діаметр труби 2000 мм; товщина стінки труби змінна від 150 мм до 200 мм; при температурі навколишнього середовища 20°. Фізико-механічні характеристики труби: для сталі Ст3: $E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\nu_1 = 0,3$; $\alpha_1 = 1,25 \cdot 10^{-5}$ 1/°C; для бетону С25/30: $E_2 = 3,6 \cdot 10^4$ МПа; $\nu_2 = 0,25$; $\alpha_2 = 1,0 \cdot 10^{-5}$ 1/°C

Граничні умови у даній розрахунковій задачі були наступними, нижня поверхня $x = 0$ була жорстко закріплена, а ліва та права поверхні мали вільне переміщення по координаті u .

Розрахунок напружено-деформованого стану залізобетонної труби проведено методом скінченних елементів [11, 12] за допомогою ліцензійної програми FEMAP with MSC NASTRAN.

У даній задачі переріз труби моделюється криволінійним стержнем (одновимірним елементом), а залізобетон – плоскими елементами. Перевагою такого підходу є швидка підготовка моделі та порівняно невелика кількість скінченних елементів. Недоліком зазначеної моделі є неможливість врахування гофрів труби та коректного завдання навантажень від рухомого складу.

За одновимірний елемент вибрано елемент типу BEAM (рис.4)

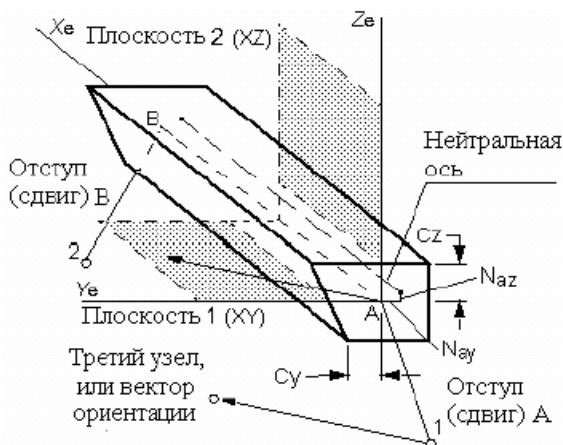


Рис.4. Одновимірний елемент типу BEAM

За двовимірний скінченний елемент вибрано елемент типу PLATE – чотири вузловий чотирикутник (рис.5).

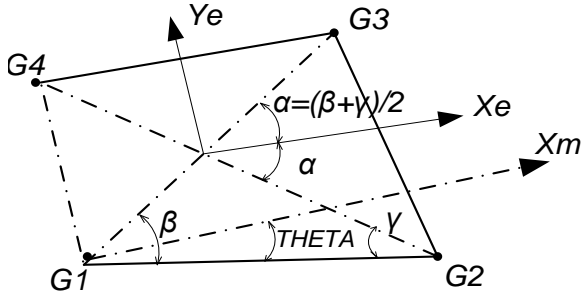


Рис.5. Двовимірний чотири кутовий оболонковий скінченний елемент типу PLATE

Кількість вузлів скінченноелементної сітки становить 15874 шт, які утворюють 7551 елементів.

Результати напружень та деформацій, які виникають від заданих постійних та тимчасових вертикальних та горизонтальних тисків наведені на рис.6-8.

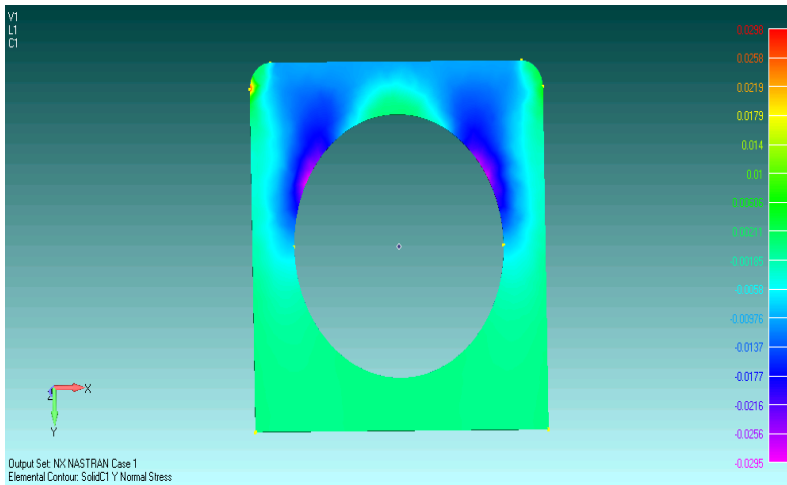


Рис.6. Вид напружень у трубі

Результати проведеного розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонної труби, яка підсилена металевою гофрованою конструкцією показали, що максимальна величина напружень виникає у верхній частині труби і становить 0,024 МПа, а деформації при цьому складають $9,3 \cdot 10^{-4}$.

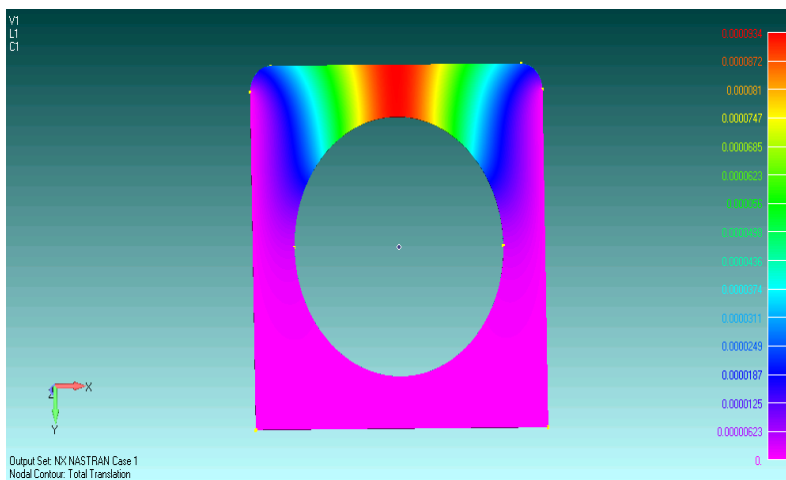


Рис.7. Вид деформації у труби

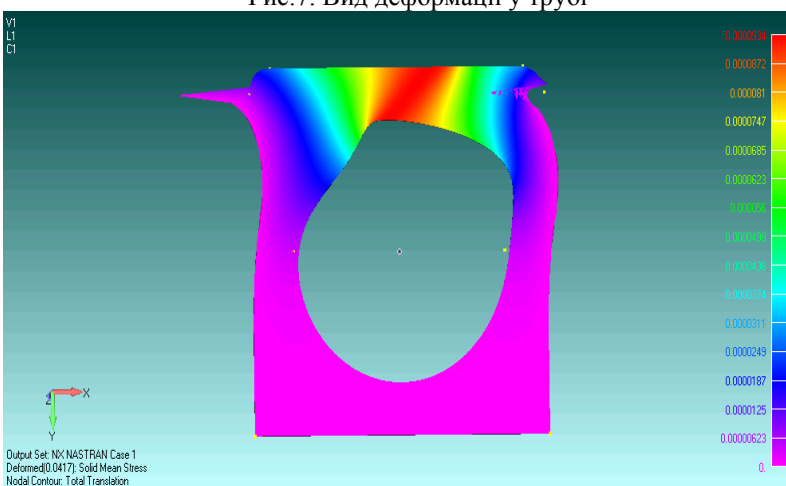


Рис.8. Деформований стан труби

Отже, результати розрахунків свідчать про те, що застосування металевих гофрованих конструкцій при ремонті дефектних залізобетонних труб на залізничних та автомобільних дорогах України надасть можливість державі зекономити витрати коштів на ремонт дефектних споруд та збільшить їх термін експлуатації.

Висновки. Застосування металевих гофрованих труб при капітальному ремонті залізобетонних труб дозволить не зупиняти рух залізни-

чного та автомобільного транспорту, виконати відновлювані роботи у незначні терміни, практично не змінювати умови експлуатації транспортних споруд та крім того дозволить зменшити витрати коштів держави на їх реконструкцію та подальшу експлуатацію.

Summary

In this work the method of calculation of the pressure forces on the top of reinforced concrete pipe is provided, which is reinforced by corrugated metal pipe into static and dynamic loads, depending on the height of the filling over it. As a result of static and dynamic pressure forces, the deflected mode of the pipe in the interaction with soil backfill is calculated by means of finite element method.

1. Ковальчук В. В. Стан та проблеми забезпечення довговічності прогонових будов мостів // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – Донецьк, 2012. – № 32. – С. 226–235. 2. Коваль П. М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій / П. М. Коваль, І. П. Баб'як, Т. М. Сітдикова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту зал. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – Д.: Видавництво ДНУЗТ. – 2010. – №39. – С. 114–117. 3. Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. – К., 2007. – 122 с. 4. Содержание, реконструкция, усиление и ремонт мостов и труб / В.О. Осипов [и др.]; под ред. В.О. Осипова и Ю.Г. Козьмина. – М.: Транспорт, 1996. – 471 с. 5. Боровик, Г.М. Искусственные сооружения на железных дорогах : сб. лекций. В 2 ч. Ч.1. Конструкции и проектирование мостов и труб в условиях сурового климата / Г.М.Боровик. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 174 с. 6. Черепов В.В., Шилін І.В. Варіантне проектування при прийнятті інженерного рішення по відновлення експлуатаційного стану водопропускної труби. – АДІ ДНТУ, 2012 р. – 1 с. 7. СОУ 45.120-00034045-015:2012 Оцінка технічного стану та експлуатаційної придатності інженерних споруд на залізницях України. – К.: Інпрес, 2013. – 99 с. 8. ОДМ 218.2.001-2009 Рекомендации по проектированию водопропускных металлических гофрированных труб: Распоряжение Федерального дорожного агентства от 21 июля 2009 г. № 252-р. – 126 с. 9. Чертовикова Е. И. Применение металлических гофрированных труб на автомобильных дорогах / Е. И. Чертовикова, А. Ю. Шаров. – Екатеринбург.: Электронный архив УГЛТУ, 2012. – С. 287–289. 10. Лучко Й. Й. Мости, труби і тунелі / Й. Й. Лучко, О. С. Распопов, П.М.Коваль // [За ред. Й. Й. Лучка]. – Львів: Каменяр, 2014. – 879 с. 11. Wysokowski A., Howis J. Obliczenia przepustow Metodą Elementow Skończonych – MES, 2011, nr 3 (36), s. 54–57. 12. Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P.: Metoda elementow skończonych w mechanice konstrukcji. Ćwiczenia z wykorzystaniem ANSYS. Ofi cyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2005.