

**Абрамов В. М., к.т.н., доцент** (Донбаська національна академія будівництва і архітектури, м. Івано-Франківськ (на період воєнного стану), vr09@i.ua)

## **ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ДОРОЖНІХ СПОРУД З МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Розглянуто деякі питання щодо методики розрахунку дорожніх споруд з металевих гофрованих конструкцій. Такі споруди вже тривалий час досить ефективно використовуються в багатьох країнах світу як водопропускні труби, малі мости, шляхопроводі та тунелі. Удосконалення методики розрахунку і проєктування цих типів дорожніх споруд є досить актуальним.

Проаналізовано існуючі колишні і сучасні нормативні документи у частині вихідних положень розрахунку і розрахункових граничних станів дорожніх споруд з гофрованого металу. Визначено положення, які потребують уточнення, зокрема це стосується того, що стінки труби в ґрунті знаходяться переважно в умовах стискання зі згинанням, а не центрального стиску. Показано, що граничним станом першої групи для дорожніх споруд з гофрованого металу (гнучкої труби чи склепінню під насипом) є припинення приросту опору ґрунту (і несучої здатності споруди) при стисканні зі згинанням споруди переважаним вертикальним тиском від ґрунту і тимчасового рухомого навантаження або стан на межі втрати загальної стійкості форми при рівномірному (вертикальному і бічному) обтисненні споруди.

**Ключові слова:** металеві гофровані конструкції; дорожня споруда; граничний стан.

**Вступ.** Дорожні споруди з металевих гофрованих конструкцій вже тривалий час досить ефективно використовуються в багатьох країнах світу у вигляді водопропускних труб, малих мостів, шляхопроводів і тунелів. Вони достатньо прості за конструкцією і монтажем, потребують значно менше фінансових і трудових витрат, та витрат часу на возведення і експлуатаційні заходи в порівнянні із традиційними типами дорожніх споруд. Все більше поширюються в останні десятиліття такі дорожні споруди і в Україні, накопичується

досвід їх застосування. Тому питання наявності необхідної нормативно-методичної бази щодо проектування цих типів дорожніх споруд та її удосконалення, особливо в частині розрахунку, є досить актуальними.

**Стан питання і аналіз публікацій.** Вперше металеві гофровані водопропускні труби діаметром до 1–2 м були застосовані в період початку масового будівництва залізничних шляхів сполучення ще в кінці XIX століття, тоді ж і трохи пізніше з'явилися перші пропозиції щодо їх розрахунку, в тому числі на підставі випробувань [1]. Найбільше розповсюдження такі споруди знайшли в США, Канаді, Швеції, Фінляндії, Польщі, Японії, в різних інших країнах Європи і Азії, причому із різними формами і розмірами отвору до 25 м і більше, з докладними інструкціями з конструювання, розрахунку й монтажу [2]. Є також численні публікації за результатами теоретичних і експериментальних досліджень і з різними пропозиціями щодо розрахунку [3; 4].

На території колишнього СРСР після тривалої перерви знов почалось використання металевих гофрованих дорожніх водопропускних труб у 70-х роках минулого століття за нормативним документом [5]. Були виконані відповідні дослідження [6], за результатами яких з'явився нормативний документ [7], в якому були викладені технічні умови проектування і будівництва металевих гофрованих труб діаметром 1,5–3,0 м під дорожнім насипом. Норми [7] містять розрахунок несучої здатності за теорією граничної рівноваги у пружно-пластичному стані з урахуванням пружного опору ущільненого ґрунту, який забезпечує загальну статичну рівновагу системи «конструкція – ґрунт» і перевірку стійкості форми при рівномірному обтисненні труби ґрунтом. Відносні деформації (зміни вертикального і горизонтального діаметрів) в цих нормах пропонувалося обмежувати величиною 5%, незалежно від діаметру труби і висоти насипу.

Український нормативний документ з проектування і будівництва дорожніх споруд з металевих гофрованих конструкцій було створено у 2007 році [8]. В ньому містяться технічні умови щодо використання споруд різних форм (коло, арка, коробчаста арка, еліпс та ін.) з розміром отвору до 8 м.

За нормами [8] елемент стінки труби (одна хвиля гофра) підлягає розрахунку на міцність згідно з формулою, яку наведено у нормативному документі [9] для центрально розтягнутих або

стиснутих елементів:

$$\frac{N}{A} \leq R_y m, \quad (1)$$

де  $N$  – нормальне зусилля в гофрованій конструкції (в горизонтальному перерізі) від розрахункових навантажень, що припадають на довжину одного гофра, Н;

$A$  – площа перерізу однієї хвилі гофра, см<sup>2</sup>;

$R_y$  – розрахунковий опір сталі за границею текучості, Па;

$m = 0,9$  – коефіцієнт умов роботи.

Далі в документі [8] наводиться методика визначення зусилля  $N$ , розрахунку відносних змін горизонтального або вертикального діаметрів, які не повинні перевищувати 5%, розрахунок болтових з'єднань гофрованих елементів та інших розрахунків.

З наведеної вище короткої характеристики документа [8] видно, що за основні розрахункові граничні стани прийнято:

- досягнення напружень текучості в стінках труби в умовах центрального стиску (перша група граничних станів);
- досягнення відносної зміни горизонтального або вертикального діаметрів величини 5% (друга група граничних станів).

**Мета і завдання.** На основі аналізу і розрахунково-теоретичних досліджень планується надати пропозиції щодо уточнення прийнятих в чинних нормах вихідних положень і розрахункових граничних станів дорожніх споруд з металевих гофрованих конструкцій.

**Основна частина.** Виходячи з того, що вертикальний і бічний тиск на підземну трубу чи трубу підґрунтового насипу не однаковий (переважає вертикальний), така труба (у поперечному перерізі) у загальному випадку знаходиться в умовах стиску з вигином, а не центрального стиску за формулою (1), як це прийнято в документі [8] при розрахунку за граничним станом першої групи. Центральне стиснення стінки труби приймається можливим в окремому випадку зрівняння вертикального і бічного стиску (як опору на переміщення стінки в бік ґрунту), але тоді потрібна перевірка не на центральне обтиснення, а на забезпечення загальної стійкості форми труби (чи арки) згідно [6; 7] з формулою

$$\frac{N}{\varphi A} \leq R_y m, \quad (2)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт зниження несучої здатності при перевірці на стійкість форми.

За теорією граничної рівноваги дійсний граничний стан гнучкої гофрованої труби (чи, наприклад, склепіння у вигляді півколової арки) під дорожнім насипом (тобто в ущільненому ґрунтовому середовищі) настає тоді, коли три точки верхньої безопорної зони труби при її деформуванні розміщуються на прямій лінії із допущенням появи пластичних шарнірів у цих точках [10] (рис. 1).

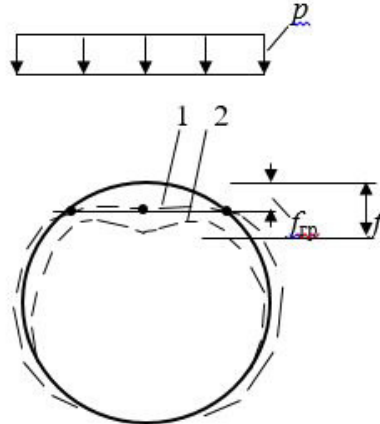


Рис. 1. Схема стану граничної рівноваги гнучкої труби в ущільненому ґрунті, під дорожнім насипом (1) і поза граничною рівновагою (2)

Після такого стану (пунктирна крива 1) верх склепіння переміщується всередину, бічні стінки відходять від ґрунту (пунктирна лінія 2) і подальше деформування  $f$  (після  $f_{кр}$ ) йде без зростання навантаження  $p$  за відсутністю опору з боку ґрунту, як це схематично показано на рис. 2 (діаграма Прандтля).

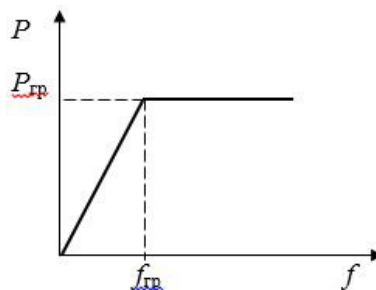


Рис. 2. Спрощений графік залежності  $f$  від  $p$

Граничним є навантаження  $P_{zp}$ , яке відповідає граничному прогину  $f_{zp}$ . Приблизно за вищевикладеною схемою визначення граничного навантаження (тобто несучої здатності гнучкої труби під дорожнім насипом) виконано і дослідження у колишньому СРСР в 70-ті роки минулого століття [6]. Ці дослідження також показали, що втрата несучої здатності гнучкої труби в ґрунті не пов'язана із досягненням текучості у одному чи декількох перерізах стінки і навіть із виникненням «механізму» з пластичними шарнірами, доки є опір ґрунту переміщенням стінок, що досить давно враховується при проєктуванні деяких типів обробок тунелів, гірських виробок і труб [6; 11].

При граничному навантаженні, визначеному так, як вказано вище, прогин верху склепіння може бути значно вище допустимого за умовами безпечної експлуатації дороги через локальне осідання поверхні дорожнього покриття над трубою. Тому деформації труб потрібно обмежувати.

Можна визначити граничне навантаження, тобто несучу здатність труби чи склепіння у допустимому граничному деформованому стані (із граничним прогином  $f_{zp}$ ), розглядаючи статичну рівновагу системи «труба – ґрунт» і приймаючи сили пружного опору і модель ґрунту згідно з гіпотезою Фусса – Вінклера [6] за формулою

$$R = \delta Ak, \quad (3)$$

де  $\delta$  – переміщення стінки у бік ґрунту;

$R$  – рівнодіюча опору ґрунту, спрямована за радіусом (для труби) чи горизонтально (для півколової арки), на відповідній частці площі  $A$  стінки, де  $\epsilon$  переміщення у бік ґрунту;

$k$  – коефіцієнт постелі, який при модулі деформації ґрунту  $E$  і коефіцієнті Пуассона ґрунту  $\mu$  для труби радіусом  $r$  приймають за формулою Б. Н. Галеркіна [6; 10]

$$k = \frac{E}{(1+\mu)r}. \quad (4)$$

Використовуючи стрижневу розрахункову схему плоскої задачі і метод скінчених елементів (МСЕ), можна визначити бічні переміщення  $\delta$  стінок труби чи склепіння спочатку тільки від вертикального умовного навантаження  $p$  (без урахування бічного

опору ґрунту). При допустимому граничному прогині  $f_{\text{пр}}$ , приймаючи товщину стрижнів такою, при якій їх згинальна жорсткість дорівнює жорсткості стінки з гофрованого металу (шириною 1 м, за умовами плоскої задачі) можна встановити зв'язок між  $\delta$  і  $f$ . За визначеними таким чином переміщеннями  $\delta$  вузлів стрижневої моделі у бік ґрунту можуть бути знайдені, за формулами (5) і (6), сили бічного опору  $R$  ґрунту, які спрямовані радіально (для кола) чи горизонтально (для півколової арки) і прикладені у вузлах схеми. Далі, з умов статичної рівноваги схеми із урахуванням сил опору  $R$  (які вже визначені) можна знайти дійсне значення навантаження  $p$  при допустимому деформованому стані (із прийнятим допустимим  $f_{\text{пр}}$ ), враховуючи те, що опір ґрунту майже не змінює схему деформування (тільки дуже незначно зменшується кут  $\psi$ ).

Наприклад, для аркового безшарнірного склепіння, змодельованого стрижнями (16 шт. шириною 1 м), у формі півкола радіусом 2 м із гофрованого металу 150×50×5 (відповідно довжина хвилі, її висота і товщина металу, мм, геометричні характеристики перерізу хвилі надані у [8]) величину  $p$  граничного навантаження у рівні верху склепіння отримано методом підбору. При граничному прогині  $f_{\text{пр}}$ , прийнятому рівним 80 мм, це навантаження дорівнює 171,6 кН/м<sup>2</sup>. Таке навантаження відповідає висоті насипу над склепінням  $h=9,05$  м ґрунту з питомою вагою 19 кН/м<sup>3</sup>, з модулем пружності  $E=10$  МПа, включаючи додаткову умовну висоту ґрунту, еквівалентного тимчасовому навантаженню НК-100 чи НК-80. Навантаження  $p$ , яке рівномірно розподілене вздовж прогину (див. рис. 1), прикладено у вузли зі значеннями, відповідними горизонтальним відстаням між вузлами. Результати цього розрахунку показано на рис. 3–8.

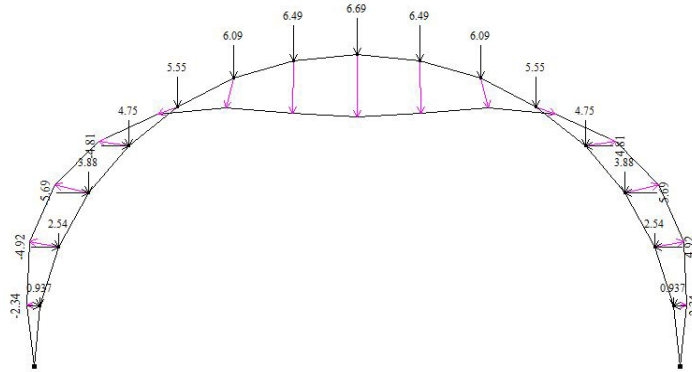


Рис. 3. Стрижнева розрахункова схема, вертикальне та бічне (від пружного опору ґрунту) навантаження (в тс) і вектори переміщень вузлів (у бічних вузлів майже горизонтальні, як і прийняті напрями опору ґрунту)

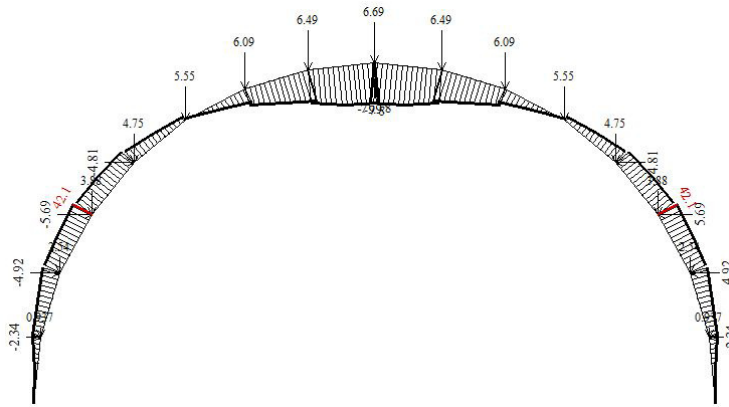


Рис. 4. Епюра переміщень стінок склепіння  
(максимальний прогин  $f_{\varphi} = 79,8$  мм)

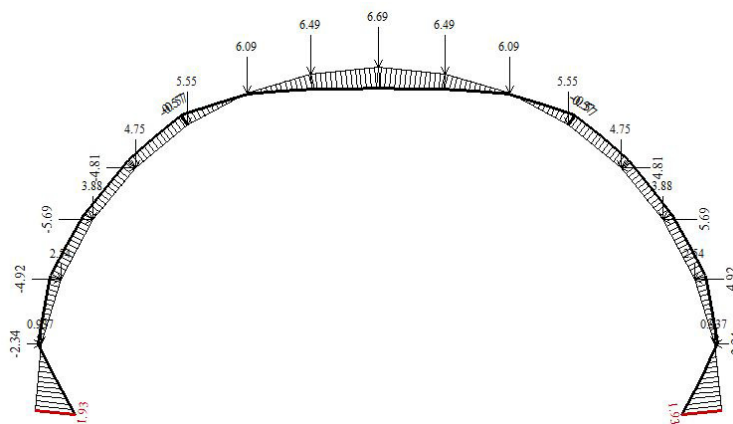


Рис. 5. Епюра згинального моменту  $M$   
(максимальне значення у 10,3 кНм/м)

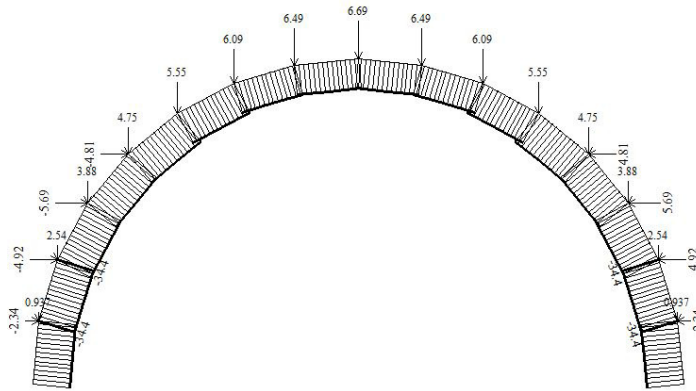


Рис. 6. Епюра зусилля  $N$  (максимальне значення 344 кН/м)

Загальна стійкість форми склепіння за формулою (2) з урахуванням розрахункових значень ( $N = 344$  кН;  $A = 63$  см<sup>2</sup>;  $R = 240$  МПа;  $m = 0,7$ ) і значення коефіцієнта  $\varphi = 0,36$ , яке знайдено за методикою документа [7], гарантується ( $151,67 < 168,0$ ).

Таким же чином виконується розрахунок труби (кола), тільки сили опору ґрунту  $R$  прикладаються радіально.

**Висновки.** Дійсним граничним станом першої групи для розглянутих споруд (гнучкої труби чи склепінню під насипом) є припинення приросту опору ґрунту (і несучої здатності споруди) при стисканні зі згинанням споруди вертикальним тиском від ґрунту і тимчасового навантаження або стан на межі втрати загальної стійкості форми при рівномірному (вертикальному і бічному) обтисненні споруди.

Розрахункове граничне значення вертикального тиску на споруду від ґрунту і тимчасових навантажень (несуча здатність споруди) визначається з умов статичної рівноваги системи «споруда – ґрунт» при допустимому деформованому стані (прогину) споруди з урахуванням пружного бічного опору ґрунту, і/або з умов забезпечення загальної стійкості форми споруди в умовах рівномірного обтиснення.

Питання граничного прогину потребує додаткових досліджень.

1. Герцог А. А. Гофрированные трубы на автомобильных дорогах. Москва : Гушосдор, 1939. 112 с.
2. Handbook of steel drainage end highway construction on products. Ontario : Corrugated Steel Pipe Inst., 2002. 470 p.
3. Petterson L., Sundquist Y. Design of soil steel composite bridges. Stockholm :



KTN Royal Institute of Technology, 2007. 98 p. **4.** Абрамов В. М. Спосіб розрахунку ґрунто- сталевих аркових гофрованих мостів за деформаційним критерієм з урахуванням нелінійної роботи. *Автошляховик України*. 2012. № 3 (227). С. 45–48. **5.** ВСН 176–71. Оргтрансстрой. Технические указания по проектированию, изготовлению и постройке металлических гофрированных водопропускных труб (для опытного применения). М., 1971. 30 с. **6.** Металлические гофрированные трубы под насыпями / Н. М. Колоколов, О. А. Янковский, К. Б. Щербина, С. Э. Черняховская. М. : Транспорт, 1973. 120 с. **7.** ВСН 176–78. Инструкция по проектированию и постройке металлических гофрированных водопропускных труб [Утв. Минтрансстроем СССР и МПС СССР от 15 авг. 1978 г.]. М. : Оргтрансстрой, 1979. 131 с. **8.** ВБН В.2.3 – 218 – 198 : 2007. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд з листових гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Відомчі будівельні норми України. Київ : Укравтодор, 2007. 49 с. **9.** ДБН В.2.3 22 : 2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Державні будівельні норми України. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 73 с. **10.** Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно–теоретический / под ред. А. А. Уманского. Кн. 1. М. : Стройиздат, 1973. 416 с. **11.** Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. М. : Недра, 1994. 382 с.

## REFERENCES:

**1.** Gertsog A. A. Gofrirovannyye trubyy na avtomobilnykh dorogakh. Moskva : Gushosdor, 1939. 112 s. **2.** Handbook of steel drainage end highway construction on products. Ontario : Corrugated Steel Pipe Inst., 2002. 470 p. **3.** Petterson L., Sundquist Y. Design of soil steel composite bridges. Stockholm : KTN Royal Institute of Technology, 2007. 98 p. **4.** Abramov V. M. Sposib rozrakhunku hrunto – stalevykh arkovykh hofrovanykh mostiv za deformatsiynym kryteriim z urakhuvanniam nelineinoi roboty. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. 2012. № 3 (227). S. 45–48. **5.** VSN 176–71. Orgtransstroy. Tehnicheskie ukazaniya po proektirovaniyu, izgotovleniyu i postroyke metallicheskih gofirovannykh vodopropusknykh trub (dlya opyitnogo primeneniya). M., 1971. 30 s. **6.** Metallicheskie gofirovannyye trubyy pod nasyipyami / N. M. Kolokolov, O. A. Yankovskiy, K. B. Scherbina, S. E. Chernyahovskaya. M. : Transport, 1973. 120 s. **7.** VSN 176–78. Instruktziya po proektirovaniyu i postroyke metallicheskih gofirovannykh vodopropusknykh trub [Utv. Mintransstroem SSSR i MPS SSSR ot 15 avg. 1978 g.]. M. : Orgtransstroy, 1979. 131 s. **8.** VBN V.2.3 – 218 – 198 : 2007. Sporudy transportu. Proiektuvannia ta budivnytstvo sporud z lystovykh hofrovanykh konstruktsii na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia. Vidomchi budivelni normy Ukrainy. Kyiv : Ukravtodor, 2007.

49 s. **9.** DBN V.2.3 22 : 2009. Mosty ta truby. Osnovni vymohy proiektuvannia. Derzhavni budivelni normy Ukrainy. K. : Minrehionbud Ukrainy, 2009. 73 s. **10.** Spravochnik proektirovschika promyishlennyih, jilyih i obschestvennyih zdaniy i soorujeniy. Raschetno–teoreticheskiy / pod red. A. A. Umanskogo. Kn. 1. M. : Stroyizdat, 1973. 416 s. **11.** Bulyichev N. S. Mehanika podzemnyih soorujeniy. M. : Nedra, 1994. 382 s.

---

**Abramov V. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor**  
(Donbas National Academy of Construction and Architecture,  
Ivano-Frankivsk (for the period of martial law), vr09@i.ua)

### **FEATURES OF THE CALCULATION OF ROAD STRUCTURES FROM METAL CORRUGATED ELEMENTS**

**Some issues regarding the methodology of designing road structures made of metal corrugated elements, which have been used quite effectively in many countries of the world for a long time as culverts, small bridges, overpasses and tunnels, are considered. Improvement of the design methodology of these types of road structures is quite urgent.**

**The existing former and modern regulatory documents have been analyzed in part of the initial provisions of the calculation and the calculated limit states of road structures made of corrugated metal. The provisions that need to be clarified have been determined, in particular, this concerns the fact that the pipe wall in the soil is mainly in compression with bending, and no central compression.**

**It is shown that the limiting state of the first group for road structures made of corrugated metal (flexible pipe or vault under an embankment) is the cessation of the growth of soil resistance (and the bearing capacity of the structure). At the same time, the operation of the structure in compression with the bending of the structure by vertical soil pressure and live load or the state at the limit of loss of overall shape stability with equal (vertical and lateral) compression is considered.**

**Proposals are given on the limiting value of the vertical pressure on the structure from the ground and temporary loads (the bearing capacity of the structure). It is shown that this can be determined from the conditions of static equilibrium of the "structure-soil" system with**

**an acceptable deformed state (deflection) of the structure, taking into account the elastic lateral resistance of the soil, or from the conditions for ensuring the overall stability of the structure's shape under conditions of all-round compression.**

**A numerical example of calculating the vertical load on an arched structure under a road embankment using a rod models and finite element method.**

***Keywords:* metal corrugated structures; road construction; limit state.**

---