



• © В.М. Абрамов, канд. техн. наук, доцент (ДонНАБА)

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ҐРУНТО-СТАЛЕВИХ АРОЧНИХ ГОФРОВАНИХ ШЛЯХОПРОВІДІВ ТА МОСТІВ

**Анотація.** Відзначені основні особливості розрахунку металевих гофрованих споруд під дорожніми насипами, які впливають з необхідності розглядати такі споруди не інакше, як систему “конструкція – ґрунт”, наведені відповідні числові обґрунтування.

**Ключові слова:** автомобільна дорога, арка, дорожній насип, пружний опір, несуча здатність.

**Аннотация.** Отмечены основные особенности расчета металлических гофрированных сооружений под дорожными насыпями, вытекающие из необходимости рассматривать такие сооружения не иначе, как систему “конструкция-грунт”, приведены соответствующие численные обоснования.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, арка, дорожная насыпь, упругое сопротивление, несущая способность.

**Annotation.** The principal features of calculation of metal corrugated constructions under road embankments are noted. These peculiarities result from need to consider such constructions just as construction-soil system. The corresponding numerical justifications are given.

**Key words:** road, arch, road embankment, elastic resistance, bearing capacity.

### Вступ

В умовах майже повної відсутності достатньої нормативно-методичної бази з розрахунку, конструювання та зведення порівняно нових для України (як і для інших країн пострадянського простору) економічних і швидко монтованих дорожніх засипних споруд з гофрованого металу (малих мостів, шляхопроводів, водопропускних труб), які успішно застосовуються у всьому світі, є необхідність звернути увагу на ряд важливих особливостей таких об'єктів.

Огляд та аналіз джерел інформації з даного розділу транспортного будівництва свідчать про те, що у фахівців, які беруться за проектування таких об'єктів, досі переважає традиційний підхід, зокрема, до їхнього розрахунку – як до звичайних конструкцій, що вільно деформуються, для яких ґрунт засипки є тільки навантаженням [1]. Такий підхід не можна визнати раціональним, оскільки при цьому залишаються без уваги оригінальні відмінні властивості таких конструкцій. Про необхідність ще раз відзначити специфіку споруд такого типу свідчить також наявна доступна інформація про наслідки, що пов'язані з помилками їх проектування та будівництва [2], іноді, на жаль, трагічні [3].

З результатів обстежень справності експлуатованих дорожніх водопропускних труб з гофрованого металу, експериментальних та теоретичних досліджень [4–6] (у тому числі й автора цієї статті, який займається даною темою з початку 80-х років минулого сторіччя, коли відновився інтерес транспортних будівельників колишнього СРСР до таких конструкцій після тривалої перерви) відомий перелік їх особливостей, основні з яких викладені нижче.

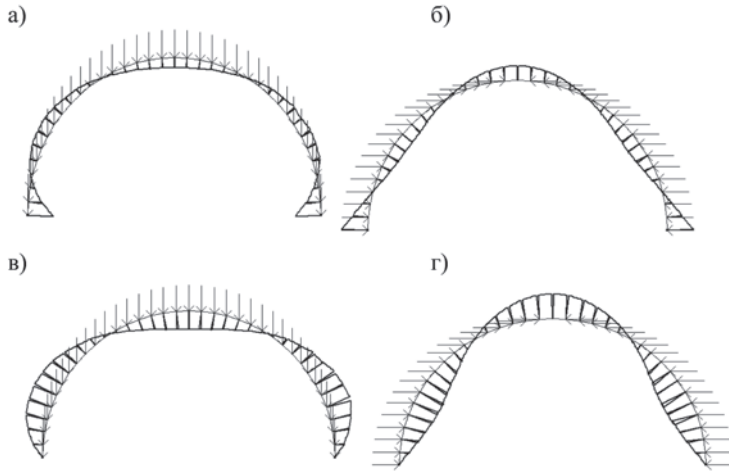
### Основна частина

По-перше, помилково обмежувати оцінку їхньої експлуатаційної придатності тільки традиційним визначенням напружено-деформованого стану самої металевої гофрованої конструкції, як такої, що вільно

деформується, вважаючи при цьому ґрунт тільки навантаженням. Сама по собі гнучка тонкостінна гофрована труба або арка без урахування-опору ґрунту витримує дуже мале навантаження. Спочатку ідея використання гнучкої конструкції (труби або арки) в ґрунті полягала саме в тому, щоб включити цей ґрунт в роботу і обмежити деформації самої гнучкої конструкції [1]. Тому замість оцінки напружено-деформованого стану тільки самої гнучкої арки варто розглядати несучу здатність і експлуатаційну придатність взаємодіючої системи “конструкція – ґрунт”, як це робиться при розрахунках тунельних обрештувань та інших подібних об'єктів, і як показано, наприклад, у роботах [1, 7, 8].

По-друге, в розрахунок повинні прийматися такі значення властивостей ґрунту засипки, які реально можуть бути забезпечені в процесі будівництва і в ході всієї подальшої експлуатації. Від цього залежить відповідність розрахункової схеми фактичним умовам роботи конструкції в частині врахування пружного опору у відповідь на деформації арки (випинання бокових стінок) переважаючим вертикальним тиском ґрунту засипки (дорожнього насипу) від власної ваги і ваги транспортних засобів, а, значить, залежить, наскільки правильно визначена несуча здатність системи “конструкція – ґрунт”.

Як приклад, розглянемо арочний металевий гофрований шляхопровід, стислий опис і причини руйнування якого наведені в [3] (напівкругова арка радіусом приблизно 9,5 м, висота засипки над її верхом 11,0 м, гофр SuperCor фірми ViaCon International AB з довжиною і висотою хвилі, відповідно, 381 мм та 140 мм при товщині листа 7 мм, межа текучості сталі  $\sigma_T = 315$  МПа). Якщо виконати перевірочний розрахунок (для спрощення – тільки за згинаючими зусиллями) як звичайної конструкції, що вільно деформується, то для арки одиначної ширини (1,0 м, за умовами плоскої задачі) отримаємо (**рис. 1**):



**Рис. 1.** Згинаючі моменти в напівкруговій безшарнірній (а, б) і двошарнірній (в, г) арці під насипом, як такої, що вільно деформується від вертикального (а, в) та від бокового (б, г) тиску ґрунту

- від вертикального навантаження (без урахування рухомого) максимальний згинаючий момент в опорному перетині стінки при жорсткому закладанні п'ят складе  $M = - 73,30$  тм і в боковій стінці при шарнірному закріпленні  $M = - 64,78$  тм;

- від бокового тиску ґрунту момент (зворотного знака) в тих самих перетинах складе при жорсткому закладанні п'ят  $M = 39,14$  тм (якщо засипка – піщаний ґрунт) і  $M = 19,57$  тм (якщо засипка – глинистий ґрунт), а при шарнірному закріпленні, відповідно  $M = 33,02$  тм і  $M = 16,51$  тм;

- з урахуванням дії бічного тиску ґрунту, що вирівнює навантаження на арку, сумарний максимальний згинаючий момент для безшарнірної арки буде дорівнювати  $M = - 34,16$  тм (засипка піщана) і  $M = - 53,73$  тм (засипка глиниста), а для двошарнірної арки, відповідно,  $M = - 31,76$  тм і  $M = - 48,27$  тм.

Встановлені за таким дуже спрощеним розрахунком сумарні значення згинаючого моменту значно перевищують значення граничного пружного моменту  $M_{пр}$ , що для даної конструкції дорівнює  $M_{пр} = 31500,0 \cdot 0,0003 = 9,45$  тм, тут 315 МПа – межа текучості ( $\sigma_T$ ) металу арки [3];  $0,0003$  м<sup>3</sup>/м – момент опору ( $W$ ) перетину стінки [9]. З такого розрахунку за критерієм досягнення напруженнями в арці, що вільно деформується, межі текучості при вертикальному (переважаючому) і тільки активному горизонтальному тиску ґрунту впливає, що граничною є висота засипки всього 1,5 м над верхом арки. Зрозуміло, що такий розрахунок взагалі не відображає реальну роботу даної конструкції, оскільки насправді вона витримувала деякий час задане навантаження (засипку висотою 11,0 м над верхом арки і вагу транспортних засобів).

За способом розрахунку арки під насипом з урахуванням бічного навантаження як пружного опору ґрунту, запропонованому в роботі [7], для розглянутої конструкції (арки радіусом  $r = 9,5$  м одиничної ширини з гофрованого металу з модулем пружності  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа і моментом інерції перерізу стінки арки шириною 1 м,  $I = 0,17 \cdot 10^{-4}$  м<sup>4</sup> [9]) отримаємо:

- величина власної несучої здатності  $q_0$  за критерієм досягнення граничного прогину  $f = 0,025 r$  (за умовою забезпечення рівності проїзду над спорудою), досягнутої даною аркою в пружній стадії роботи металу за формулою (2) роботи [8], складе  $q_0 = 97,2$  кН/м;

- величина збільшення несучої здатності  $q_r$  за рахунок пружного опору ґрунту з модулем деформації  $E_r = 25,0$  МПа у відповідь на випинання бічних стінок за методикою, яка наведена у [7], становитиме  $q_r = 172,0$  кН/м;

- повна несуча здатність  $q_{пр}$  гофрованої арки буде дорівнювати  $q_{пр} = 97,2 + 172,0 = 269,2$  кН/м, що згідно з графіком на рис. 1 роботи [7] відповідає висоті засипки над верхом арки 12,0 м (або 11,5 м, якщо враховувати тимчасове рухоме стандартне навантаження НК-80).

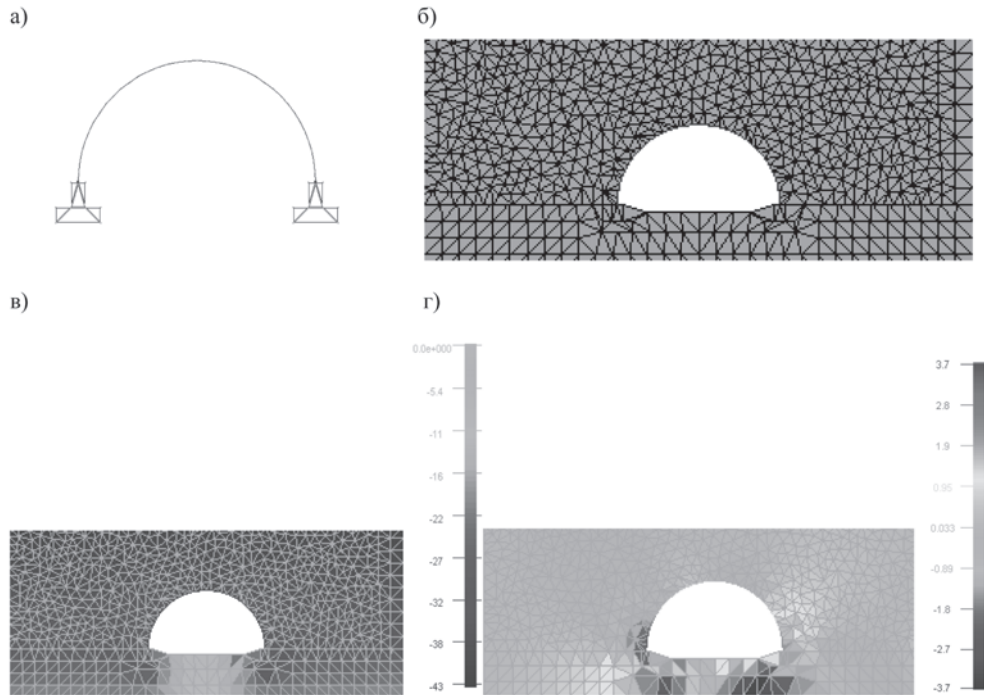
Результати розрахунку за таким способом показують, що опір ґрунту засипки збільшує несучу здатність гнучкої гофрованої арки в даному випадку приблизно у 3 рази. Ці результати більше відображають роботу реальної конструкції, що розглядається [3]. З них також видно, що при модулі деформації ґрунту засипки  $E_r = 25,0$  МПа і заданому навантаженні ( $q = 260,0$  кН/м від ваги засипки висотою 11,0 м над аркою) несуча здатність системи “конструкція – ґрунт” була забезпечена з невеликим запасом (з коефіцієнтом 1,1) і за умови, що цей модуль буде менше  $E_r = 25,0$  МПа, реальне навантаження перевищить несучу здатність системи “конструкція – ґрунт” з відповідними наслідками. Якщо, наприклад, при засипці цієї реальної конструкції був забезпечений модуль деформації ґрунту не більше  $E = 20,0$  МПа, то висота засипки над аркою не повинна була перевищувати 9,0 м. Зауважимо, що в тексті документу про цю реальну аварійну конструкцію як раз і відзначено низьку якість ущільнення засипки [3].

Розрахунком методом скінченних елементів можна отримати найбільш повну картину про роботу розглянутого дорожнього об'єкта, причому відразу всього комплексу його взаємодіючих елементів (власне арки, опору, насипу і основи), що складають систему “конструкція – ґрунт” (рис. 2).

З отриманих результатів розрахунку за таким методом при середніх значеннях властивостей ґрунту основи (як для суглинку із модулем деформації  $E_r = 14,0$  МПа, кутом внутрішнього тертя  $\phi = 18^\circ$ , питомим зчепленням,  $c = 0,015$  МПа) зокрема, встановлено:

- у цьому випадку нормальне зусилля в стінці арки на 1,0 м її ширини ( $N = 1367,0$  кН) більше, ніж від ваги ґрунту над аркою ( $N = 1144,0$  кН) внаслідок різниці осідань насипу над аркою і поряд з нею через різні жорсткості арки та ґрунту і виникаючих при цьому сил тертя, що спрямовані донизу й додатково навантажують арку);

- з урахуванням прийнятих у цьому розрахунку вихідних даних напруження в стінці розглянутої арки одиничної ширини від нормального зусилля ( $\sigma_N = 157126,4$  кН/м<sup>2</sup>) значно більше напружень від згинального моменту ( $\sigma_M = 3333,3$  кН/м<sup>2</sup>) та переміщення



а) конструктивна схема; б) розрахункова схема; в, г) розрахункові переміщення (ізополю та шкала значень, мм), відповідно вертикальні та горизонтальні

Рис. 2. Основні дані розрахунку ґрунто-сталевого арочного гофрованого шляхопроводу за методом скінченних елементів

стілки порівняно малі (рис. 2), що вказує на можливість роботи арки в умовах, що наближаються до рівномірного радіального обтиснення, коли напівкругова гнучка арка найбільш раціональна і висота її засипки 11,0 м не є граничною (при забезпеченні стабільності прийнятих в розрахунок характеристик ґрунту засипки).

#### Висновки

Розглянуті вище деякі основні особливості розрахунку ґрунто-сталевих арочних гофрованих конструкцій під дорожніми насипами приводять до таких висновків.

Розрахунок такої гнучкої споруди раціонально виконувати з урахуванням того, що велика частина зовнішнього навантаження повинна бути прийнята ґрунтом засипки і при цьому перевірка несучої здатності системи “конструкція – ґрунт” не повинна вичерпуватися тільки оцінкою напружено-деформованого стану самої арки.

Залежно від співвідношення жорсткостей елементів системи “конструкція – ґрунт” (власне арки, ґрунту основи і ґрунту засипки) вертикальне навантаження на конструкцію може бути як більше (коли осідання насипу поруч з аркою перевищує його осідання над аркою), так і менше ваги ґрунту засипки над нею (коли переважає осідання ґрунту над аркою).

Найбільш повно використовується власна несуча здатність напівкругової гнучкої арки в умовах, набли-

жених до її рівномірного радіального обтиснення, проте така розрахункова ситуація не повинна бути визначальною та замінювати розрахунок на стиск з вигином, так як насправді забезпечення ідеальної стабільності властивостей ґрунту засипки малоімовірне.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Тюкалов Ю.Я., Токарев А.Г. Моделирование предварительного напряжения в арочных грунтозасыпных металлических мостах // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – №11. – С. 33-34.

2. Осокин И.А. Совершенствование методов расчета металлических гофрированных конструкций с эксплуатационными повреждениями: Дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Новосибирск: ФГОУ

ВПО СГУПС, 2014.

3. Причины сентябрьского ДТП в Симферополе – ТАСС. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tass.ru/proisshestiya/1564074>.

4. Металлические гофрированные трубы под насыпями / Н.М. Колоколов, О.А. Янковский, К.Б. Щербина, С.Э. Черняховская. – М.: Транспорт, 1973. – 117 с.

5. Абрамов В.Н. Металлические гофрированные своды под грунтовой засыпкой: Автореферат дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Л.: ЛИИЖТ, 1989. – 21 с.

6. Абрамов В.Н. Особенности работы гибкого свода под насыпью на деформируемом основании // Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури: Будівельні конструкції та споруди. Вип. 3 (51) – Макіївка: ДонНАБА, 2005. – С. 34-38.

7. Абрамов В.М. Спосіб розрахунку ґрунто-сталевих арочних гофрованих мостів за деформаційним критерієм, зважаючи на нелінійну роботу // Автошляховик України. – 2012. – № 3. – С. 45-48.

8. Абрамов В.М. Пружна та пружно-пластична робота ґрунто-сталевих гофрованих арочних споруд під дорожніми насипами // Автошляховик України. – 2014. – № 2. – С. 35-37.

9. СТО 33027391-2013. Изделия строительные металлические из гофрированных листов для инженерных сооружений. Общие технические условия. – М.: ОАО “Опытный завод “Гидромонтаж”, 2013. – 34 с.