



УДК 625.745.2

© В.Н. Абрамов, канд. техн. наук, зав. отделом (ДП «Донецкий ПромстройНИИпроект»)

# СПОСОБ РАСЧЕТА ГРУНТО-СТАЛЬНЫХ АРОЧНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ МОСТОВ ПО ДЕФОРМАЦИОННОМУ КРИТЕРИЮ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ

*Аннотация.* Предложен достаточно простой способ практического расчета грунто-стальных гофрированных арочных мостов на основании деформационного критерия и расчетной схемы, отражающей наиболее важные особенности работы гибких труб и сводов под дорожными насыпями и результаты исследований.

*Ключевые слова:* расчет, арка, несущая способность, прогиб, отпор.

*Анотація.* Запропоновано досить простий спосіб практичного розрахунку грунто-сталевих гофрованих арочних мостів на основі деформаційного критерію і розрахункової схеми, що відображає найбільш важливі особливості роботи гнучких труб і арок під дорожніми насипами та результати досліджень.

*Ключові слова:* розрахунок, арка, несуча здатність, прогин, відпір.

*Annotation.* Rather simple way of practical calculation of the soil-steel corrugated arch bridges on the basis of deformation criterion and the settlement scheme reflecting the most important features of work of flexible pipes and the arches under road embankments and results of researches is offered.

*Key words:* calculation, arch, bearing capacity, deflection, resistance.

## Введение

Создание простой, достаточно ясной и удобной для практического применения методики расчета арочных грунто-стальных гофрированных конструкций, применяемых в качестве малых мостов и путепроводов, остается актуальной задачей для специалистов транспортного строительства Украины. Не решена пока в полной мере эта задача и в других постсоветских странах. Так, например, появившиеся в России в последнее десятилетие нормативно-методические документы [1, 2] в части расчета либо повторяют содержание норм 70-х годов прошлого столетия для круглых труб диаметром до 3,0 м [3], либо приводят не вполне убедительные эмпирические формулы. Имеющиеся в малом количестве современные публикации на эту тему [4 – 7] показывают, что поиск решений данной задачи ведется, однако пока без достаточных представлений об особенностях работы сооружений такого типа. Предложения автора данной статьи, опубликованные ранее, также нуждаются в доработке, как в части исходных

предпосылок расчета, так и в части критериев оценки несущей способности гибкого свода в грунте [8].

Цель данной статьи – дополнить и скорректировать имеющиеся предложения по расчету на примере полукругового свода.

## Основная часть

Анализ известных данных об особенностях работы гибких труб под насыпями [9, 10], результатов исследований, в том числе и выполненных автором [11 – 13], показывает, что целесообразно исходить из следующих расчетных предпосылок:

- с достаточной для практики точностью можно рассматривать «вырезанную» из средней части свода арку единичной ширины (плоскую задачу);
- критерием утраты эксплуатационной пригодности считаем прогиб  $f$  более 2,5 % от радиуса  $r$  [3], при котором ровность проезда над аркой нарушается сверх нормы (хотя известно, что исчерпание несущей способности гибких труб и арок в грунте связано с началом «отлипания» боковых стенок от



грунта (сплющивание), происходящем при значительно большем прогибе [8, 10]);

- собственная несущая способность арки вне грунта  $q^o$  (вертикальная равномерно распределенная нагрузка в уровне ее верха), определяется с допущением пластических шарниров (использовать только упругую стадию не рационально – она заканчивается при очень малом прогибе (примерно  $0,01r$ ), а значит и малом выпучивании, когда боковой отпор грунта еще слабо реализован);

- приращение несущей способности системы «конструкция – грунт»  $q_z$ , определяется как нагрузка, уравновешивающая действие бокового отпора грунта на образованный из арки деформированный (с допустимым прогибом  $f$ , равным  $2,5\%$  от  $r$ ) механизм с полными шарнирами.

В рамках указанных предпосылок расчет сводится к проверке условия:

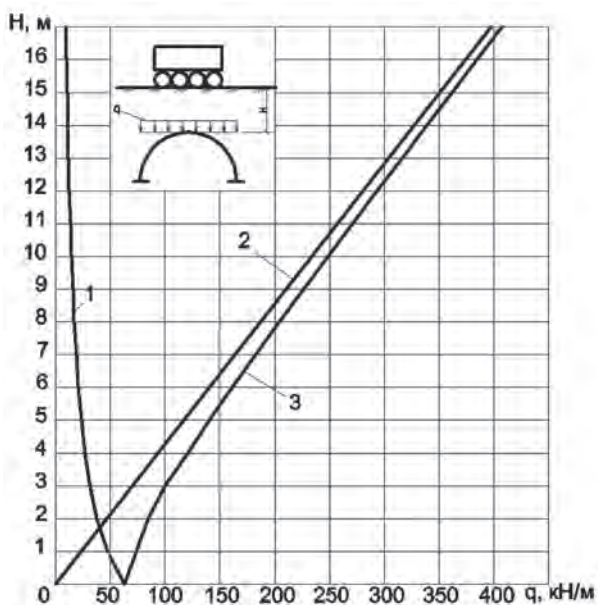
$$q \leq m q_{np} / \gamma, \quad (1)$$

где  $q$  – расчетная равномерно распределенная вдоль пролета нагрузка в уровне верха арки от насыпи и транспортных средств, определяемая в соответствии с нормами проектирования мостов и труб [14], при учете нагрузки НК-80 и грунта с удельным весом  $18,0 \text{ кН/м}^3$  можно использовать график на **рис. 1**;

$m$  и  $\gamma$  – соответственно коэффициенты условий работы и надежности по назначению (рекомендуется принять  $m = 0,85$  и  $\gamma = 1,15$  согласно [3, 9]);

$q_{np}$  – несущая способность (предельная нагрузка), определяемая как сумма указанных выше составляющих:

$$q_{np} = q^o + q_z. \quad (2)$$



**Рис. 1.** Нагрузка  $q$  на арку (шириной  $1,0 \text{ м}$ ) от транспортного средства НК-80 (1); от засыпки (2) и суммарная (3), при засыпке  $H$  грунтом с удельным весом  $18,0 \text{ кН/м}^3$

Используя закономерности теории предельного равновесия с учетом решений методом «выравнивания моментов» [15, 16] получим достаточно простые выражения для определения собственной несущей способности арки вне грунта на изгиб (напряжения от нормальной силы не превышают  $10\%$  напряжений от изгиба и могут учитываться коэффициентом условий работы):

- при бесшарнирном опирании (с образованием «механизма» с 5-ю пластическими шарнирами):

$$q^o = M^o / 0,0783 r^2; \quad (3)$$

- при шарнирном опирании (с образованием «механизма» с 3-я пластическими шарнирами):

$$q^o = M^o / 0,0851 r^2, \quad (4)$$

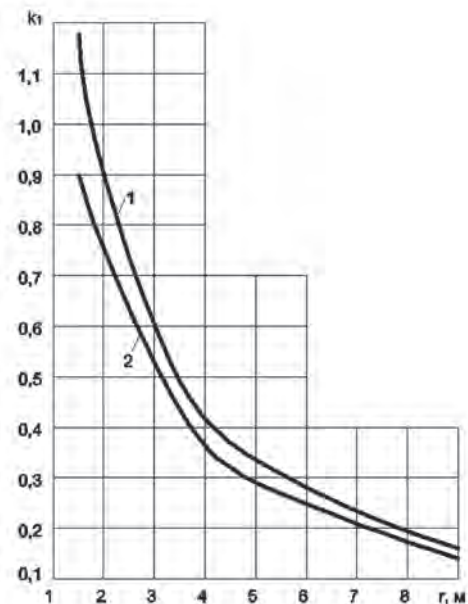
где  $M_{np \text{ нл}} = \sigma_m W_{нл}$  – предельный момент, соответствующий образованию пластического шарнира в стенке арки с пределом текучести  $\sigma_m$  и пластическим моментом сопротивления  $W_{нл}$  на единицу ширины ( $W_{нл} \approx 1,3 W$ , согласно [3]).

Для определения приращения несущей способности  $q_z$  можно использовать полученную численными расчетами арок разных радиусов при прогибе  $f = 0,025 r$  зависимость этого параметра от равнодействующей упругого отпора  $R_z$  (**рис. 2** и **рис. 3**):

$$q_z = k_1 k_2 R_z, \quad (5)$$

где  $k_1$  – коэффициент, определяемый по графикам на **рис. 2**;

$k_2 = E_z / 30$  – коэффициент, зависящий от модуля деформации грунта засыпки  $E_z$  (компрессионного), принимаемого в МПа.



**Рис. 2.** Коэффициент  $k_1$ , выражающий зависимость между нагрузкой  $q$  и результирующей отпора  $R_z$  для арки шириной  $1,0 \text{ м}$  при бесшарнирном (1) и шарнирном (2) опирании

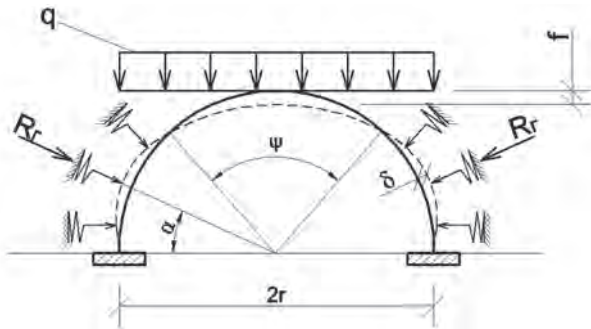


Рис. 3. Схема нагрузок на арку в грунте и ее деформаций

Равнодействующую упругого отпора грунта  $R_z$  можно определить на основе гипотезы Фусса-Винклера как произведение коэффициента упругого отпора  $k$  на площадь эпюры отпора грунта  $A$ , пропорционального перемещениям (т.е. на площадь эпюры перемещений боковых стенок с максимальной величиной  $\delta$ , состоящей на каждой из полуарок из двух криволинейных треугольников) в соответствии с рис. 3 по формуле:

$$R_z = k A = k \delta r (\sin 0,5 \alpha + \sin (45 - 0,5 \alpha - 0,25 \psi)), \quad (6)$$

где  $\alpha$  — угол точки наибольшего выпучивания стен арки, равный  $34^\circ$  при бесшарнирном опирании и  $25^\circ$  — при шарнирном опирании (см. рис. 3);

$\psi$  — угол безотпорной зоны для полукруговой арки с прогибом  $f = 0,025 r$ , равный примерно  $68^\circ$  при бесшарнирном опирании и  $72^\circ$  при шарнирном опирании.

Коэффициент упругого отпора  $k$  можно определить по формуле Б.Г. Галеркина [9]:

$$k = E_z / ((1 + \mu) r), \quad (7)$$

где  $E_z$  и  $\mu$  — соответственно модуль деформации (компрессионный) и коэффициент Пуассона грунта насыпки (дорожной насыпи).

Площадь эпюры перемещений  $A$  боковой стенки полуарки также можно определить по графикам на рис. 4, которые составлены базирываясь на численные расчеты полукруговых арок разных радиусов.

Экспериментами и численными исследованиями установлено, что схема деформирования полукруговой арки под грунтовой насыпкой с преобладанием вертикальной нагрузки остается такой же, как и вне грунта — верх арки прогибается, а боковые стены выпучиваются [10, 13]. При этом величина наибольшего выпучивания  $\delta$  стенок полукруговой арки связана с прогибом  $f$  верха следующим образом:

- при бесшарнирном опирании:

$$\delta = 0,63 f; \quad (8)$$

- при двухшарнирном опирании:

$$\delta = 0,70 f. \quad (9)$$

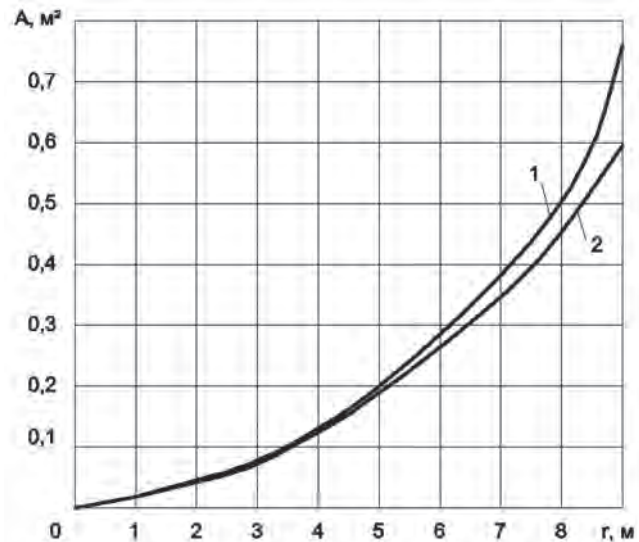


Рис. 4. Площади эпюр перемещений (выпучивания) боковой стенки для полукруговых арок разных радиусов с прогибом  $f = 0,025 r$  при бесшарнирном (1) и шарнирном (2) опирании

**Пример.** Требуется проверить пригодность арочного малого моста пролетом  $2 r = 6,0$  м из металла с гофром  $164 \times 57 \times 8$  (соответственно, длина волны, высота волны, толщина, мм) при высоте автодорожной насыпи над верхом арки  $H = 10,0$  м и с учетом колесной нагрузки НК-80. Предел текучести металла арки  $\sigma_m = 240,0$  МПа. Пластический момент сопротивления сечения стены арки шириной  $1,0$  м составляет  $W_{pl} = 0,00015 \times 1,3 = 0,000195$  м<sup>3</sup>. Грунт насыпки имеет удельный вес  $\gamma_z = 18,0$  кН/м<sup>3</sup>, модуль деформации  $E_z = 20,0$  МПа и коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ . Опирание арки шарнирное.

Расчетная вертикальная нагрузка на «вырезанную» из свода арку шириной  $1,0$  м по графику на рис. 1 равна  $250,0$  кН/м.

Собственная несущая способность арки равна:

$$q^o = 24000,0 \cdot 0,000195 / (0,0851 \cdot 3^2) = 6,11 \text{ тс/м} \approx 61,1 \text{ кН/м}.$$

Допустимый прогиб арки и наибольшее боковое выпучивание равны:

$$f = 3,0 \cdot 0,025 = 0,075 \text{ м}; \quad \delta = 0,7 \cdot 0,075 = 0,0525 \text{ м}.$$

Коэффициент упругого отпора и его равнодействующая равны:

$$k = 2000,0 / ((1+0,3) \cdot 3) = 512,82 \text{ т/м}^3 \approx 5128,2 \text{ кН/м}^3;$$

$$R_z = 512,82 \cdot 0,0525 \cdot 3 \cdot (0,22 + 0,25) = 37,96 \text{ тс} \approx 379,6 \text{ кН}.$$

Приращение несущей способности за счет отпора грунта составляет:

$$q_z = 0,53 \cdot (20,0 / 30,0) \cdot 37,96 = 13,41 \text{ тс/м} \approx 134,1 \text{ кН/м}.$$

Полная несущая способность арки с учетом отпора грунта равна:



$$q_{np} = 6,12 + 13,41 = 19,52 \text{ тс/м} \approx 195,2 \text{ кН/м.}$$

Расчетная нагрузка превышает несущую способность арки:

$$25,0 \text{ тс/м} > (19,52 \cdot (0,85 / 1,15)) = 14,4 \text{ тс/м,}$$

а предельная высота засыпки равна 5,3 м (см. рис. 1), т.е. меньше заданной  $H = 10,0$  м.

Проверим, будет ли достаточно увеличить модуль деформации грунта с 20,0 МПа до 30,0 МПа при тех же остальных параметрах:

$$k = 3000,0 / (1 + 0,3) \cdot 3 = 769,23 \text{ т/м}^3 \approx 7692,3 \text{ кН/м}^3;$$

$$R_z = 769,23 \cdot 0,0525 \cdot 3 \cdot (0,22 + 0,25) = 56,9 \text{ тс} \approx 569,0 \text{ кН};$$

$$q_z = 0,53 \cdot (30,0 / 30,0) \cdot 56,9 = 30,2 \text{ тс/м} \approx 302,0 \text{ кН/м.}$$

При этом полная несущая способность с учетом отпора грунта с более высоким модулем деформации составит:

$$q_{np} = 6,11 + 30,20 = 36,31 \text{ тс/м} \approx 363,1 \text{ кН/м.}$$

В этом случае основное условие расчета удовлетворяется:

$$25,0 \text{ тс/м} < 36,31 \cdot (0,85 / 1,15) = 26,8 \text{ тс/м,}$$

для такой арки предельная высота засыпки составляет 11,0 м, т.е. больше  $H = 10,0$  м.

По прочностному критерию для рассмотренной арки шириной 1,0 м с площадью сечения стенки  $A_{cm} = 0,0103 \text{ м}^2$  в условиях, близких к равномерному радиальному обжатю, предельная нагрузка  $q_{np}$  равна:

$$q_{np} = A_m \sigma_m / 1,2 r = 24000,0 \cdot 0,0103 / 1,2 \cdot 3,0 = 68,7 \text{ тс} \approx 687,0 \text{ кН/м.}$$

Это соответствует предельной засыпке 38,0 м, что очень близко к результатам (37,0 м), полученным испытаниями точно такой же грунто-стальной арки в НИИ мостов (Санкт-Петербург, Россия) [17].

Изложенный расчет должен быть дополнен проверкой осадок фундаментов, влияющих на общую разность осадок верха насыпи над аркой и рядом с ней, а также прочности болтовых соединений элементов (например, по [3]).

#### Выводы

Показана возможность достаточно простого и в рамках общепринятых исходных предпосылок выполнения расчета грунто-стальных гофрированных арок, применяемых в качестве малых мостов и путепроводов.

Расчет грунто-стальных гофрированных арок рационально производить по деформационному критерию, эффективно используя несущую способность самой арки и отпор грунта выпучиванию стен, принимая за предельную такую нагрузку, которая соответствует допустимому прогибу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. **Рекомендации** по проектированию и строительству водопропускных сооружений из гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон). ОДМ 218.2.001 – 2009/ ОАО ЦНИИС. – М.: Росавтодор, 2009. – 206 с.

2. **Временные технические указания** по применению металлических гофрированных конструкций (для опытного применения) – Санкт-Петербург: Научно-исследовательский институт мостов, 2002. – 114 с.

3. **Инструкция** по проектированию и постройке металлических гофрированных водопропускных труб: ВСН 176–78 / Минтрансстрой. – М.: Стройиздат, 1980. – 130 с.

4. **Петрова Е.Н.** Совершенствование методов расчета обделок тоннелей из стальных гофрированных элементов: Автореферат дисс. на соиск. Учен. степ. канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 2011. – 24 с.

5. **Жинкин А.** Проблемы и перспективы типового проектирования металлических гофрированных конструкций // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 2. – С. 53–54.

6. **Фрезе М.В.** Взаимодействие металлических гофрированных конструкций с грунтовой средой: Автореферат дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Санкт-Петербург: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2006. – 23 с.

7. **Токалов Ю.Я., Токарев А.Г.** Моделирование предвзрывного напряжения в арочных грунтозасыпных металлических мостах // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 11. – С. 33 – 34.

8. **Абрамов В.Н.** О расчете арочных сооружений из гофрированного металла под дорожными насыпями // Автошляховик України. – 2011. – № 4. – С. 45 – 48.

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

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

11. **Абрамов В.Н.** Рациональный тип путепроводов, мостов и водопропускных труб под дорожными насыпями на деформируемом основании // Современные проблемы строительства. Вып. 6 (11). – Донецк: ДП «Донецкий Промстройниипроект», 2008. – С. 45 – 51.

12. **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.

13. **Абрамов В.Н.** Особенности работы гибкого свода под дорожной насыпью // Современные проблемы строительства. Вып. 2 (7). – Донецк: ДП «Донецкий Промстройниипроект», 2005. – С. 64 – 68.

14. **ДБН В.1.2–15:2009.** Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи.

15. **Руководство** к практическим занятиям по курсу строительной механики (статика стержневых систем). Под ред. Г.К. Клейна. – М.: Высшая школа, 1980. – 384 с.

16. **Клейн Г.К.** Применение способа «выравнивания моментов» при расчете труб и арок с учетом свойств пластичности железобетона // Бетон и железобетон. – 1956. – № 2. – С. 59 – 64.

17. **МГК:** Экзамен на прочность сдан // Евразия Вести. Транспортная газета. Министерство транспорта РФ. – 2008. – № 2. ✓