

УДК 625.745.2
UDC 625.745.2

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-087-096

**АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕОРЕТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ,
ЯКІ ДІЮТЬ НА ВОДОПРОПУСКНІ ТРУБИ В ЗЕМЛЯНОМУ ПОЛОТНІ
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ**

**ANALYSIS OF EXISTING THEORETICAL METHODS FOR DETERMINING LOADS
ACTING ON WATER PASSAGE PIPES IN THE EARTHEN BED OF AUTOMOBILE ROADS**



Кас'ків Володимир Іванович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Україна, м. Київ, e-mail: vi_kas@ukr.net, тел.: +380504458544

<https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>



Петрови́ч Володимир Васи́льович, кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: petrovichvv60@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-0422-2535>



Чечуга Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Україна, м. Київ, e-mail: chchuga77@gmail.com, тел. +380662019442

<https://orcid.org/0000-0003-1643-6354>



Авдєєв Максим Олегович, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: crystalmpg@gmail.com, тел. +380674286515

<https://orcid.org/0009-0007-2961-5526>



Чечуга Євген Сергійович, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: Cecugazena2@gmail.com, тел. +3800937533521

<https://orcid.org/0009-0008-6799-4843>

Анотація: У статті розглядаються актуальні проблеми проектування водопропускних труб, зокрема під високими насипами. Основну увагу приділено відсутності достовірних розрахункових

схем для визначення навантажень і напружень, які виникають у таких спорудах. Обґрунтовується необхідність аналізу напружено-деформованого стану системи «насип – водопропускна труба – основа» з метою вдосконалення інженерних методів розрахунку. Наведено основні типи навантажень, що діють на труби, зокрема вертикальний тиск від власної ваги ґрунту.

Ключові слова: будівництво, вага, деформація, навантаження, насип, просідання, пружне тіло, рухоме тимчасове навантаження, тиск, труба, улаштування труби, ущільнення, штучні споруди.

Вступ. Питання проектування водопропускних труб і особливо під високими насипами, не дивлячись на досягнуті в цій області успіхи, до останнього часу вирішені ще не достатньо повно і не задовольняють вимогам практики. Однією із основних причин такого положення слід рахувати відсутність достовірної розрахункової схеми при визначенні навантажень, які діють на такі споруди., а також епюри розподілу цього навантаження по зовнішньому периметру труби, внаслідок чого не можна достатньо оцінити напруження, які в ній виникають і гарантувати роботу водопропускних труб без можливого виникнення деформацій. Тому необхідно обстежити найбільш загальну картину напружено-деформованого стану системи “насип – водопропускна труба – основа” з метою розробки та удосконалення інженерних методів розрахунку навантажень, які діють на водопропускну трубу [1].

Виклад основного матеріалу. Загальні відомості про навантаження, які діють на водопропускні труби:

1. Навантаження від власної ваги ґрунту насипу.

Труби під насипами доріг випробовують навантаження від тиску ґрунту насипу, від власної ваги конструкції, від тимчасового рухомого навантаження залізничних і автомобільних доріг і доріг промислового транспорту.

Для водопропускних труб, які укладені під насипами автомобільних доріг постійне навантаження у вигляді власної ваги ґрунту насипу є основним [2]. Величина вертикального тиску від власної ваги ґрунту на кільця труби більша ніж від ваги стовпа ґрунту, який розташовується над трубою, так як він залежить не тільки від висоти, але і від сил внутрішнього зчеплення і тертя, які виникають по площині ковзання між стовпом ґрунту над трубою і ділянками насипу із-за різних умов їх просідання (рис. 1).

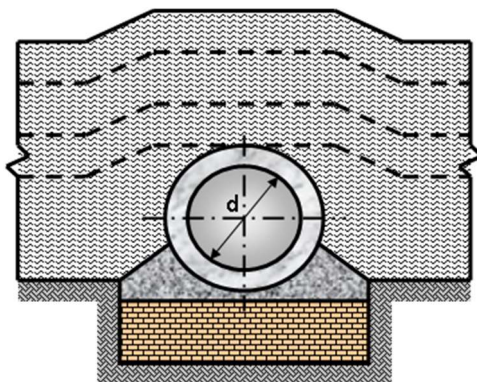


Рисунок 1– Схема роботи труби при просіданні насипу
Figure 1 – Diagram of pipe operation during embankment settlement

Навантаження на трубу від ваги насипу залежить не тільки від висоти стовпа і ваги ґрунту, але і від взаємодії частинок ґрунту в процесі їх деформування при ущільненні. По даним експериментальних досліджень роботи жорстких труб встановлено, що в деяких точках вертикальний тиск перевищує тиск від ваги стовпа ґрунту над трубою на 20-4%, а в деяких випадках в 1,5–2,0 рази.

Розрахунковий вертикальний тиск на трубу визначається за формулою:

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

де $n=1,2$ – коефіцієнт перевантаження;

C_n – коефіцієнт сили тертя;

γ_n – нормативна питома вага насипного ґрунту, кН/м³;

H – товщина шару від верху дорожнього покриття до верху кільця, м.

Розрахунковий горизонтальний тиск на бокову поверхню кільця визначається за формулою:

$$e_p = \mu_n \gamma_n \hat{H}, \quad (2)$$

де $\hat{H}$ – висота засипки по вісі дороги, рахуючи від підшви рельсів чи верху дорожнього покриття до верха кільця, м.

Для прямокутних труб тиск на стіни труби можна приймати як рівномірно розподілений по висоті, приймаючи його:

$$\hat{H} = H + h/2, \quad (3)$$

де h – висота засипки від поверхні дорожнього покриття до верха кільця труби, м.

Навантаження на трубу, яка укладена під насип залежить від ступеня жорсткості труби і способу її улаштування [3]. Фізично картина цього явища є досить ясною, що ж стосується теоретичного її вираження, то задовільного рішення на сьогодні ще не має. Зупинимось доцільно на фізичних явищах, які проходять в тілі насипу в місці улаштування труби. Роздивимось ці явища паралельно, як для шарнірних труб, так і для жорстких.

1. Шарнірні труби:

Випадок 1. Деформується основа і просідає неущільнений насип.

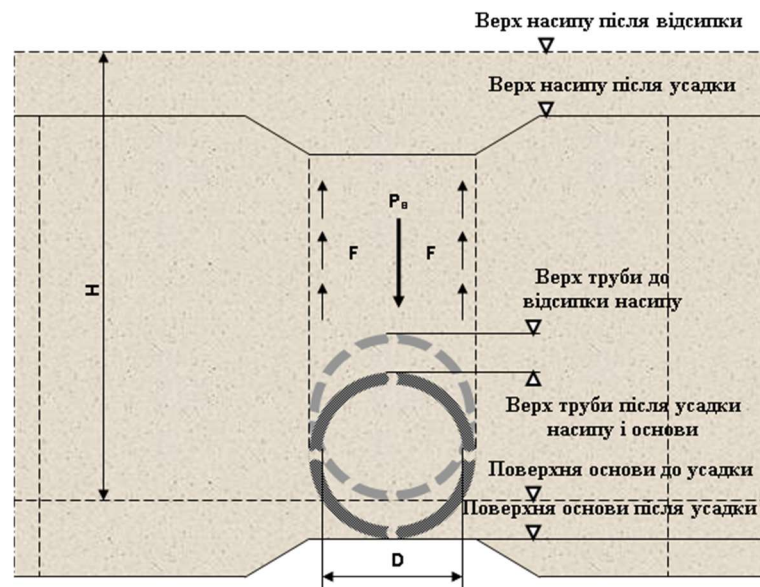


Рисунок 2 – Схема деформації основи, насипу і шарнірної труби
Figure 2 – Diagram of deformation of the base, embankment, and hinged pipe

Розглянемо ділянку насипу в місці розташування труби. Так як вага стовпа ґрунту над трубою разом з вагою самої труби менше тиску від ваги насипу, то просадка основи під трубою буде менша, чим під насипом, який оточує трубу.

Таким чином, при наявності в основі ґрунтів, які дають осідання при їх навантаженні і при неущільненому насипу будуть мати місце наступні явища:

- тиск на основу шарнірної труби, а разом з цим і просідання основи під трубою, будуть менші, чим під ділянками насипу, які прилягають до труби;
- тиск на трубу від засипки буде меншим ваги стовпа засипки над трубою;
- в результаті деформацій діаметр труби зменшується по вертикалі і збільшується по горизонталі на величину dD .

На рис. 2 приведена схема деформації основи, насипу і шарнірної труби.

Випадок 2. Основа труби не деформується, насип дає просідання.

В цьому випадку відбуваються наступні процеси:

- тиск на трубу від засипки менший ваги стовпа засипки над трубою;
- діаметр труби зменшується по вертикалі і збільшується по горизонталі на dD ;

На рис. 3 наведена схема деформації насипу і шарнірної труби.

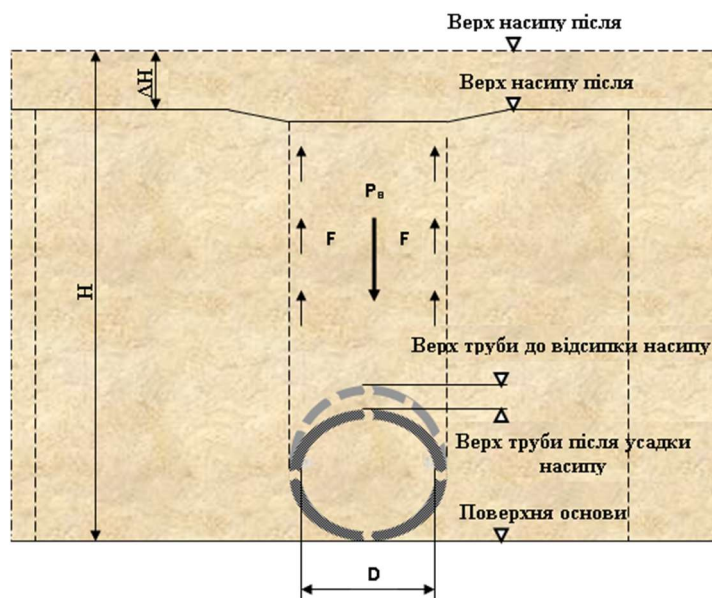


Рисунок 3 – Схема деформації насипу і шарнірної труби
Figure 3 – Diagram of embankment and hinged pipe deformation

Випадок 3. Основа насипу деформується, але насип ущільнений і просідання не дає.

В цьому випадку просідання основи під трубою і під розташованими поруч ділянками насипу будуть схожими і тиск на трубу буде дорівнювати вазі стовпа засипки (рис. 4).

Різниця навантажень на основу під трубою і під ділянками, які прилягають не повинна впливати на рівномірність просідання основи, так як навантажена зверху труба, надаючи горизонтальну дію на ґрунт і викликаючи появу пасивного тиску, буде ніби-то заклинена в трубі [4].

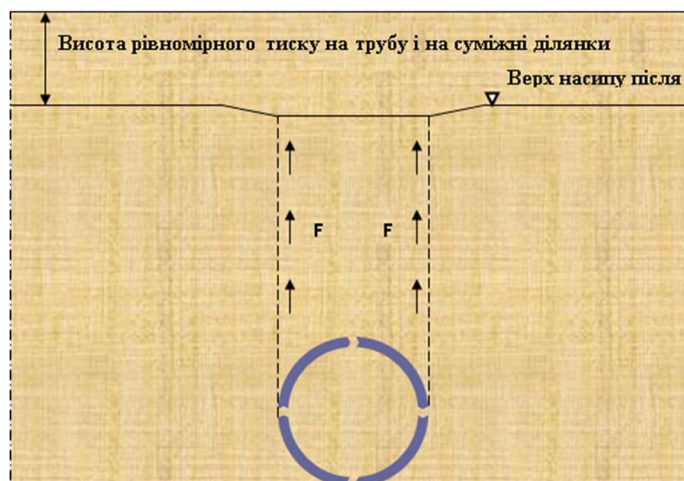


Рисунок 4 – Схема стабілізації насипу і шарнірної труби
Figure 4 – Diagram of embankment stabilization and articulated pipe

Таким чином, в цьому випадку:

- тиск на основу труби, а також просідання під трубою будуть такі ж як і під суміжними ділянками насипу;

- тиск на трубу від засипки буде дорівнювати вазі стовпа засипки.

Випадок 4. Основа не деформується і насип ущільнений.

Тут можна запропонувати таке явище. При відсіпці насипу до деякої її висоти буде відбуватися деяка деформація труби. В цей період тиск на трубу буде менший вазі стовпа засипки. Після стабілізації деформацій труби вона, також як і у випадку 3, буде ніби-то занурена в ґрунті, і тиск від відсіпаного вище насипу буде передаватися однаково як на трубу, так і на суміжні ділянки насипу. Таким чином сумарне навантаження на трубу буде меншим, ніж вага ґрунту засипки над трубою.

2. Жорсткі труби:

Випадок 1. Деформується основа і просідає неущільнений насип.

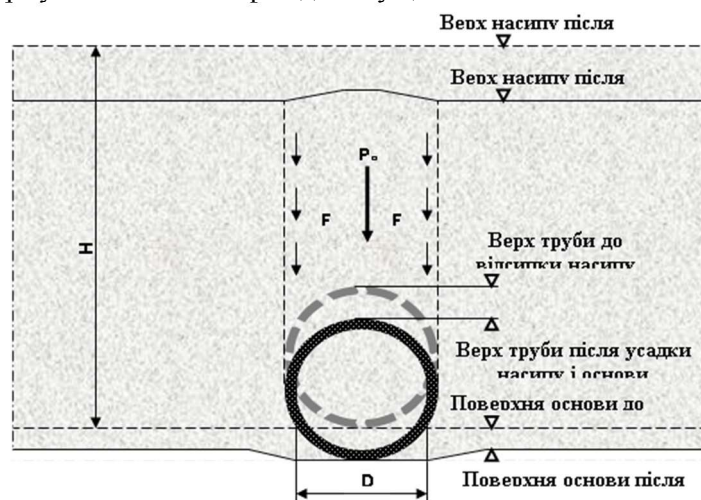


Рисунок 5 – Схема деформації основи і насипу біля жорсткої труби
Figure 5 – Diagram of deformation of the base and embankment near a rigid pipe

Тут картина буде іншою, ніж та, яка має місце при шарнірній трубі. Пружна деформація жорсткої труби настільки мала, що не може визвати зміну сил, які діють навколо труби (рис. 2.5).

Таким чином, можна прийти до наступних висновків:

- тиск в основі жорсткої труби і просідання основи під трубою буде більшим ніж під суміжними ділянками насипу;
- тиск на трубу від засипки буде більше ваги стовпа засипки над трубою;
- деформації жорсткої труби не впливають на розмір тиску на трубу чи на її основу.

Випадок 2. Основа не деформується, насип не ущільнений і дає просідання.

Картина така ж сама, як і у випадку 1.

Випадок 3. Насип ущільнений, а основа дає просідання.

Насип представляє собою по жорсткості однорідний масив (рис. 6). Умови роботи труби характеризуються наступним чином:

- тиск на трубу рівний чи більший ніж вага стовпа засипки над нею;
- тиск і просідання під трубою схожі чи менші, ніж під суміжними ділянками.

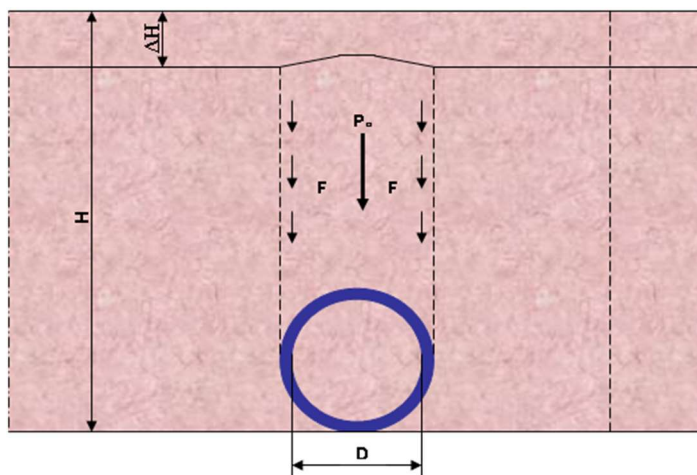


Рисунок 6 – Схема деформації насипу біля жорсткої труби
Figure 6 – Diagram of embankment deformation near a rigid pipe

Випадок 4. Основа не деформується і насип ущільнений.

Послідовність явищ буде такою: після відсіпки і ущільнення насипу до рівня верха труби прошарки, які лежать вище, будуть передавати свою вагу так само як на трубу, так і на суміжні призми насипу. Таким чином, навантаження на трубу в цьому випадку буде дорівнювати вазі стовпа засипки над нею (рис.7).

В результаті розглядання чотирьох характерних випадків улаштування шарнірних і жорстких труб під насипом можна зробити висновок, що для труб шарнірної системи тиск на трубу завжди дорівнює або менший ніж вага стовпа засипки, а для жорсткої труби завжди рівний, або більший ніж вага стовпа засипки над трубою.

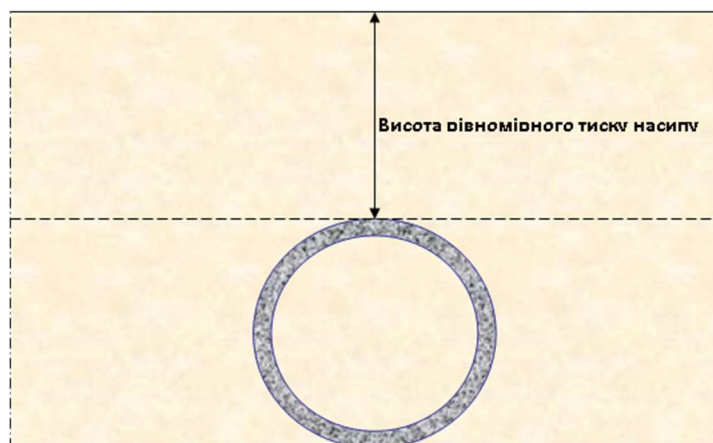


Рисунок 7 – Схема рівномірного тиску насипу на жорстку трубу
Figure 7 – Diagram of uniform pressure of a pile on a rigid pipe

Рухоме тимчасове навантаження

Інтенсивність рухомих тимчасових навантажень з плином часу збільшується. Особливо помітний цей приріст на автомобільних дорогах промислового транспорту. Тимчасове вертикальне навантаження, яке виникає в насипу над трубою спричинює вертикальний і горизонтальний тиски ґрунту на трубу. Тиск ґрунту від тимчасових рухомих навантажень на кільця труб визначається в залежності від класу навантаження на дорозі (табл. 1). Для труб під насипами визначальним є колісне навантаження НК-80. Тиск ґрунту від тимчасових рухомих навантажень (рис. 2.8) приймається з розрахунком розподілу його під кутом $\arctg 0,5$ до вертикалі і розраховується по формулі:

$$q_T = \frac{19}{H+3}. \quad (4)$$

Таблиця 1 – Мінімальна висота засипки для навантаження НК-80.

Table 1 – Minimum backfill height for loading NK-80.

навантаження	насип, м
НК-80	$H \geq 1$
АБ-51	$H \geq 1,5$
АБ-74	$H \geq 2$
АБ-151	$H \geq 3$

Горизонтальний тиск у всіх випадках дорівнює вертикальному помноженому на μ , причому для прямокутних труб вертикальне навантаження визначається для середини висоти труби. Таким чином, горизонтальний тиск на трубу від тимчасового навантаження визначається за формулою:

$$eq = \mu q_T \quad (5)$$

де q_T – вертикальний тиск від нормативного тимчасового навантаження, кН.

$$\mu = \operatorname{tg}^2 - (45^\circ - \varphi_n / 2) \quad (6)$$

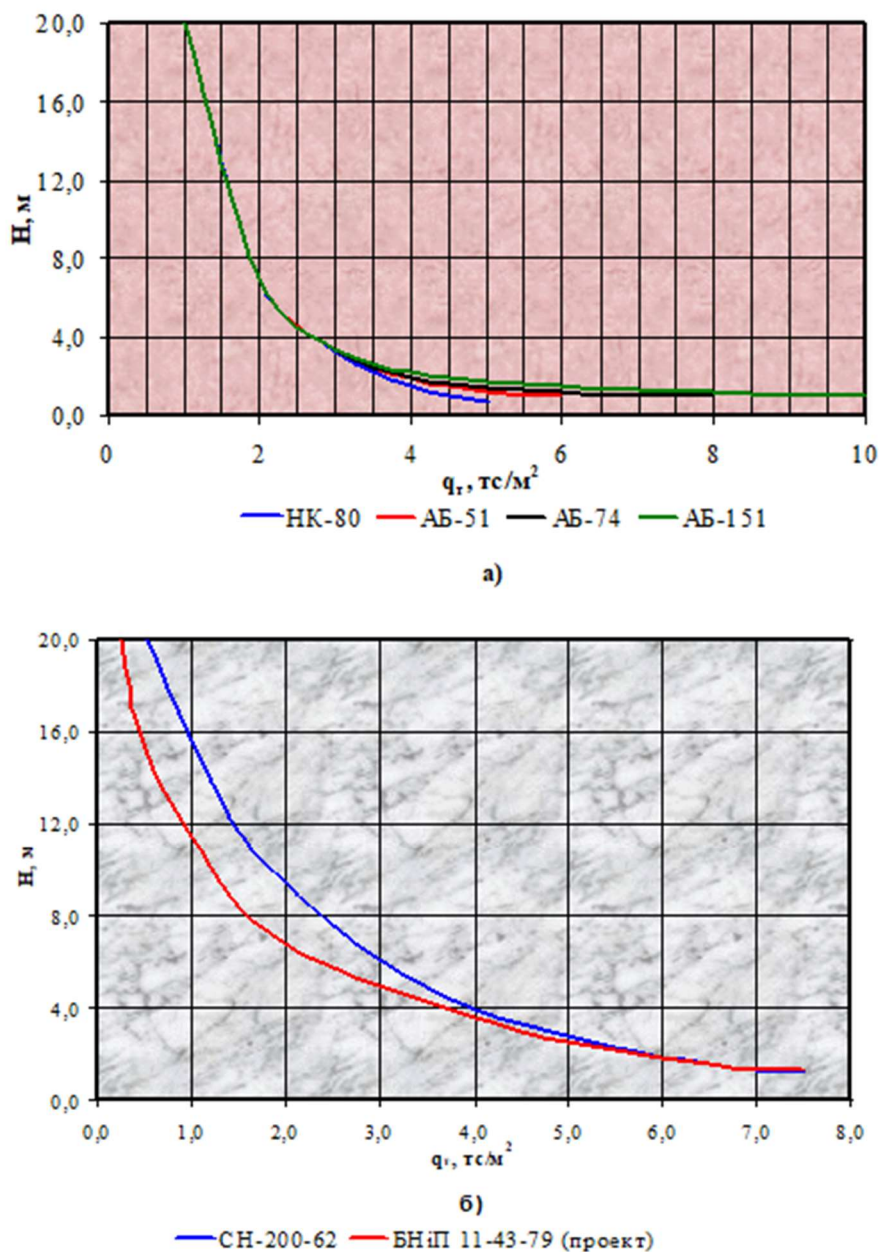


Рисунок 8 – Характер змін вертикального тиску ґрунту від тимчасового навантаження на кільця труби в залежності від висоти насипу для навантажень:

а) – автомобільних; б) - залізничних.

Figure 8 – Nature of changes in vertical soil pressure from temporary loads on pipe rings depending on embankment height for loads:

а) – road; б) – rail.

Тиск на трубу, яка укладена під насип від рухомого навантаження залежить від розміру цього навантаження, висоти розподільного шару ґрунту, розподілу тиску в тілі насипу.

Питання про розподіл тиску в тілі насипу від навантажень, які прикладені на поверхні землі достатньо чітко розгортається в роботі Г. К. Клейна, де приведені рекомендації по визначенню тиску

на труби від рухомого навантаження. Запропоновані автором формули і графік складені на основі теорії про радіальне розподілення напруг в ґрунті від вантажів, які прикладені на поверхні землі.

Для простоти розрахунку був складений графік (рис. 9), який дозволяє визначити тиск на рівні верха труби від різних навантажень, при різних висотах засипки над верхом труби. криві графіка виражають сумарне навантаження від ваги засипки і рухомого навантаження.

Висновки. Аналіз теоретичних досліджень в даній області показав, що існуючі розрахункові схеми, які ґрунтуються на гіпотезі сипучого тіла, не дивлячись на одержані в багатьох випадках цікаві рішення, не в змозі достатньо повно освітити процеси, які виникають в системі і не виключають можливості невірної визначення діючих на водопропускні труби навантажень.

Більш прогресивним порівняно з вище описаним направленням є система як пружне тіло. Такий підхід безперечно пропонує штучне ущільнення всього насипу чи окремої її частини згідно з розподіленням діючих в ньому напружень, в той час як попередня теорія розглядає насип, який ущільнюється тільки під дією власного тиску і кліматичних факторів. Таким чином видно, що гіпотеза пружного напівпростору в даному випадку не тільки більше задовольняє сьогодишньому стану справ в дорожньому будівництві, але й дозволяє забезпечити більш визначені і сприятливі умови роботи водопропускних труб.

Перелік посилань

1. ДБН В.2.3-14:2006 Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування
2. Чечуга О.С., Касків В.І., Лисенко О.П., Лисенко А.М. Деформації, які визначаються умовами статичної роботи труби в конструкції “насип – труба – основа”. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип.82. НТУ, Київ, 2011. С.173 – 180. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/82/173-180.pdf.
3. МР В.2.3-37641918-932:2023 Методичні рекомендації з проектування водопропускальних труб на автомобільних дорогах загального користування
4. ДСТУ-Н Б В.2.3-34:2016 Настанова з виконання робіт при будівництві мостів та труб.

ANALYSIS OF EXISTING THEORETICAL METHODS FOR DETERMINING LOADS ACTING ON WATER PASSAGE PIPES IN THE EARTHEN BED OF AUTOMOBILE ROADS

Kaskiv Volodymyr I., Candidate of Engineering Science (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: vi_kas@ukr.net, tel. +380504458544, <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>.

Petrovych Volodymyr V., Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Professor of the Transportation Construction and Property Management Department, National Transport University. e-mail: petrovichvv60@ukr.net, tel. +380442807338, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. OmelyanovichaPavlenka, 1, room 138, <https://orcid.org/0000-0003-0422-2535>

Chechuha Oleksand S., Candidate of Engineering Science (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: chechuga77@gmail.com, tel. +380662019442, <https://orcid.org/0000-0003-1643-6354>.

AvdeevMaksym O., postgraduate student, Road Construction and Property Management Department of National Transport University, e-mail: crystalmpg@gmail.com, tel. +380674286515, <https://orcid.org/0009-0007-2961-5526>

Cechuha Yevhen S., postgraduate student, Road Construction and Property Management Department of National Transport University, e-mail: Cecugazena2@gmail.com, tel.+3800937533521, <https://orcid.org/0009-0008-6799-4843>.

Summary. An analysis of theoretical studies in this area has shown that existing calculation schemes based on the hypothesis of a bulk material, despite the interesting solutions obtained in many cases, are unable to fully illuminate the processes that arise in the system and do not exclude the possibility of incorrect determination of the loads acting on the culverts.

A more progressive approach compared to the one described above is the system as an elastic body. This approach undoubtedly offers artificial compaction of the entire embankment or a separate part of it in accordance with the distribution of stresses acting on it, while the previous theory considers an embankment that is compacted only under the action of its own pressure and climatic factors. Thus, it is clear that the hypothesis of an elastic half-space in this case not only better satisfies the current state of affairs in road construction, but also allows for more definite and favorable operating conditions for culverts.

Keywords: construction, weight, deformation, load, embankment, subsidence, elastic body, mobile temporary load, pressure, culvert, culvert installation, sealing, civil structures.

References

1. DBN V.2.3-14:2006 Transport structures. Bridges and pipes. Design rules
2. Chechuga O.S., Kaskiw V.I., Lysenko O.P., Lysenko A.M. Deformations determined by the conditions of static operation of a pipe in a “fill-pipe-base” structure. Motorways and road construction. Issue 82. NTU, Kyiv, 2011. P. 173–180. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/82/173-180.pdf.
3. MR V.2.3-37641918-932:2023 Methodological recommendations for the design of culverts on public motorways
4. DSTU-N B V.2.3-34:2016 Guidelines for the construction of bridges and culverts.

Дата надходження до редакції 18.05.2025.