УДК 625.745.2
UDC 625.745.2

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-166-174

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВОДОПРОПУСКАЛЬНИХ СПОРУДАХ ІЗ УРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ЗМІН НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОМПЛЕКСУ “НАСИП — ТРУБА — ОСНОВА”

RESEARCH OF HYDRAULIC PROCESSES IN WATER PASSAGE STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT DYNAMIC CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE OF THE COMPLEX “EMBANKMENT — CULVERT — FOUNDATION”

Каськів 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

Петрович Володимир Васильович, *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

Токін Олександр Павлович*, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство», e-mail: a2atp@meta.ua, тел. (044)2804259, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 322,*

https://orcid.org/0000-0002-7353-4228

Чечуга Олександр Сергійович*, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Україна, м. Київ, e- mail: chechuga77@gmail.com, тел. +380662019442*

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

Анотація: У статті наведено результати експериментальних досліджень гідравлічних процесів у водопропускальних трубах при зміні їхнього напружено-деформованого стану. Розглянуто основні режими протікання потоку (безнапірний, напівнапірний, напірний) та визначено умови їх виникнення. Особливу увагу приділено фізичному моделюванню взаємодії в системі «насип — труба — основа» на базі лабораторії гідравліки НТУ з використанням критеріїв подібності Ньютона та Фруда. Експериментально встановлено залежність величини підпору (H) від деформацій (прогинів) труби. Виявлено, що прогин труби вгору призводить до суттєвого збільшення підпору (до 67%), тоді як

прогин донизу на початкових етапах сприяє зростанню пропускної здатності. Отримані дані дозволяють враховувати динамічні зміни геометрії споруди при оцінці її гідравлічної ефективності.

Ключові слова: водопропускні споруди, гідравлічні режими, напружено-деформований стан, фізичне моделювання, критерій Фруда, прогин труби, пропускна здатність, труба, кавітація.

Вступ. Надійність функціонування транспортних споруд значною мірою залежить від ефективності роботи водопропускних труб, що інтегровані в тіло насипу. Традиційні методи гідравлічного розрахунку базуються на припущенні про незмінність геометричних параметрів труби протягом усього періоду експлуатації. Проте в реальних умовах взаємодія в комплексі «насип — труба — основа» призводить до виникнення динамічних змін напружено-деформованого стану (НДС), що спричиняє деформації поперечного та поздовжнього профілів споруди.

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю встановлення кількісних зв'язків між механічними деформаціями труби та її гідравлічними характеристиками. Зміна похилу або виникнення прогинів внаслідок нерівномірного осідання основи безпосередньо впливає на швидкість потоку та рівень підпору перед спорудою.

Мета роботи: Експериментальне дослідження впливу величини та напрямку прогину водопропускної труби на її гідравлічні показники в різних режимах течії, а також обґрунтування методики фізичного моделювання таких процесів із дотриманням принципів динамічної подібності.

Виклад основного матеріалу. По режиму протікання потоку труби можуть бути безнапірними, напівнапірними і напірними (рис. 1).

Для визначення виду труб по умовам їх гідравлічної роботи необхідні певні розрахунки.

Безнапірний режим протікання потоку характеризується наявністю вільної поверхні потоку по всій протяжності труби. Труба працює в безнапірному режимі, якщо:

$$H<1{,}2h_{mp}, \tag{1}$$

де H – напір води перед трубою;
h_{mp} – висота труби.

Напівнапірний режим протікання потоку в трубі має дві ділянки: ділянка на вході і основна ділянка.

Вхідна ділянка характеризується затопленим входом в трубу, де потік доторкається до стінок труби по усьому периметру. Вхідна ділянка закінчується стискаючим розрізом з глибиною $h_c<h_{kp}$, потім потік протікає з вільною поверхнею. Умовою існування напівнапірного режиму є критерій:

$$H>h_{mp}. \tag{2}$$

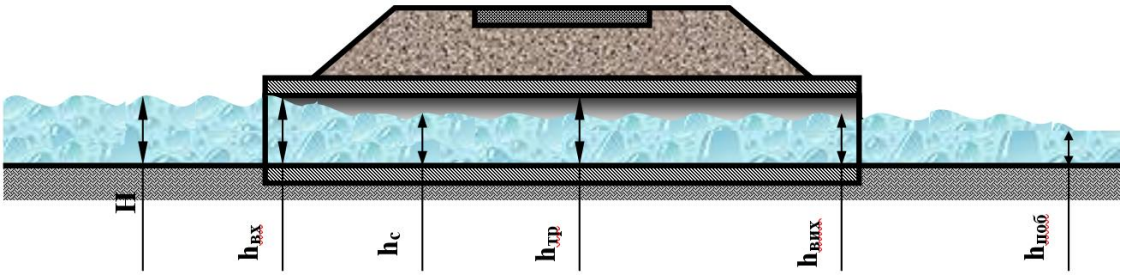
Відмітимо, що пропускна здатність напівнапірних труб більша, ніж безнапірних. Напірний режим протікання потоку в трубах характеризується тим, що весь поперечний переріз по всій довжині труби повністю заповнений водою. В цьому випадку крива вільної поверхні може бути лише на вхідній ділянці труби, де має значення вплив кривизни потоку. При напірному режимі труби володіють найбільшою пропускною здатністю.

Напірний режим має місце при одночасному виконанні трьох умов:

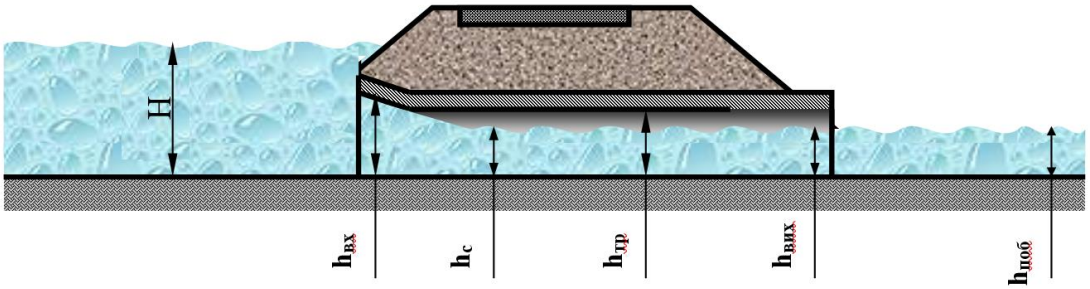
1. Вхідний оголовок повинен бути обтічним;
2. $H>1{,}4h_{mp}$;
3. $i_{mp}>i_f$;

де i_f – похил тертя, $i_f=2Q/(\mu^2W^2)$;
i_{mp} – похил дна труби.

1. Безнапірний режим течії $H \leq 1{,}2h_{тр}$



2. Напівнапірний режим течії $H \geq 1{,}2h_{тр}$



3. Напірний режим течії $H > 1{,}4h_{тр}$

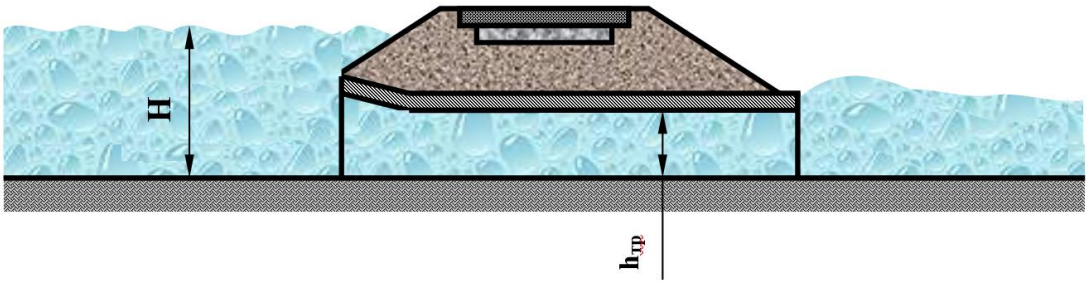


Рисунок 1– Гідравлічні характеристики системи “насип – труба - основа”
Figure 1 – Hydraulic characteristics of the “fill - culvert - foundation“ system

В області, яка може бути названа “моделюванням”, яка відноситься до досліджень тих чи інших фізичних явищ, необхідно розрізняти два різних види моделювання:

1-й вид моделювання – так зване фізичне моделювання: в цьому випадку на моделі відображується явище, яке вивчається із збереженням його фізичних властивостей.

2-й вид моделювання – математичне моделювання: в цьому випадку дослідження натурних станів чи процесів виконується шляхом вивчення явищ, які мають інший фізичний зміст, але описані тими ж математичними залежностями (які описують натурні явища).

Модель водопропускної труби, яка використовується в дослідженнях, базується на фізичних явищах. Процеси, які проходять в деформованій трубі, також механічно подібні в тому випадку, якщо в них подібне відношення усіх геометричних елементів – розмірів, відстаней, переміщень, однакове відношення щільностей і сил, які діють в певних точках і напрямках.

Для повного гідродинамічного уподібнення потоків необхідне їх геометричне і динамічне уподібнення.

Два потоки будуть геометрично подібними, якщо між їхніми певними лінійними розмірами існує постійне співвідношення:

$$L_н/L_м=a, \quad (3)$$

де a – лінійний масштаб, який показує в скільки разів розміри моделі $L_н$ зменшені порівняно з розмірами натури $L_м$.

Повинно бути також постійне співставлення площин $W_н/W_м=a^2$ і об'ємів $W_н/W_м=a^3$.

Два потоки будуть кінематично подібними, якщо лінії току на моделі і натурі в точках простору пов'язані масштабами:

$$V_н/V_м=a_{vp}, \tag{4}$$

де a_v – масштаб швидкості.

При цьому масштаб прискорення:

$$a_j=j_н/j_м=a_v^2/a. \tag{5}$$

Для динамічного уподібнення необхідно, щоб усі сили схожої природи, які діють в подібних точках моделі і натурі на частини рідини, відрізнялись між собою лише постійними масштабами. Якщо на потік в натурі діє сила $F_н$, а на подібний елемент потоку діє сила $F_м$, то:

$$F_н/F_м=a_F. \tag{6}$$

Вибір множників a, a_v, a_F не є випадковим, так як між ними існує залежність:

$$a_F=a_\rho a^2 a_v^2. \tag{7}$$

Цей вираз має назву – закон уподібнення Ньютона в масштабних множниках.

Виражаючи масштабні множники відповідними відношеннями, отримуємо:

$$F_н/(\rho_н l_н^2 v_н^2)=F_м/(\rho_м l_м^2 v_м^2/). \tag{8}$$

або:

$$Ne_н=Ne_м, \tag{9}$$

де N – критерій Ньютона.

$$Ne=idem. \tag{10}$$

Умовою гідродинамічного уподібнення є рівність на моделі і в натурі усіх сил (ваги, тиску, інерції, тертя і ін.). Внаслідок фізичних особливостей цих сил повне уподібнення усіх сил практично не можна досягти і є необов'язковим. Тому встановлюють критерій уподібнення для часткових випадків.

Критерій Фруда.

Якщо переважає дія сил ваги, то необхідне виконання наступної умови:

$$a_v^2/a_g a=1. \tag{11}$$

чи

$$(V_н^2/gl_н)=(V_м^2/gl_м)=F_r, \tag{12}$$

Де F_r – число Фруда.

Отже, геометрично подібні потоки можна рахувати гідродінамічно подібними, якщо будуть рівні числа Фруда для схожих розрізів обох потоків:

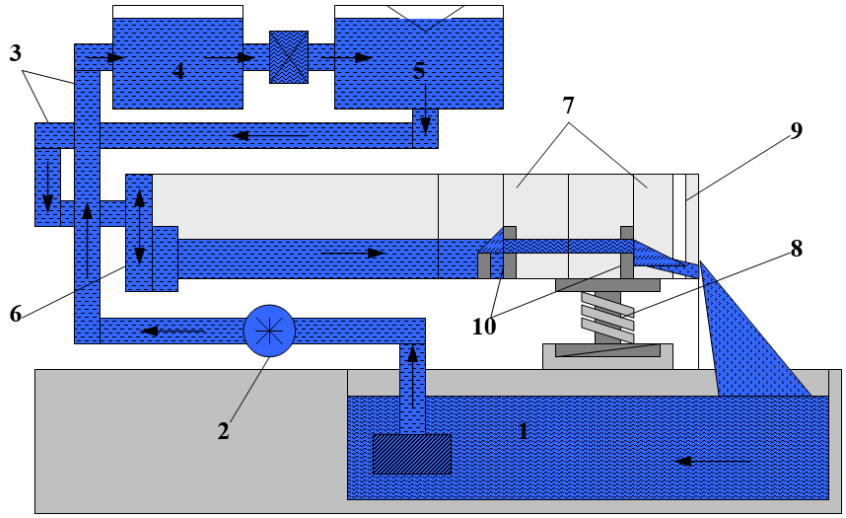
$$V_н = V_м a^{1/2}. \quad (12)$$

$$Q_н = Q_м a^{2.5}. \quad (13)$$

При моделюванні по Фруду вірне рівняння гідравлічних похилів $I_н = I_м$, що відповідає турбулентному режиму тиску в області опору.

Експериментальні дослідження були проведені в лабораторії гідравліки НТУ. Схема експериментальної установки наведена на рис. 2 [6].

Модель була встановлена в лозі. Ширина лога 1,0 м, довжина – 8,0 м. Для моделі водопропускної труби була використана полівінілхлоридна труба з внутрішнім діаметром 6.0 см, довжина труби – 1,4 м. Моделювання укосів проводилось склопластиком. Оголовок – розтрубний. Труба прогиналась за допомогою бруса, який був улаштований в верхній частині лога. В якості вимірювання прогинів труби використовувався штангенциркуль. Вимірювання проводились біля вхідної частини труби і на виході. Результати вимірювання підпору і глибини на виході при різних значеннях прогинів приведені в таблиці 1. За нульовий рахунок був прийнятий h_0=183 мм.



1 – резервуар; 2 – насосний пристрій; 3 – водопідводящі труби; 4 – напірний бак; 5 – бак з мірним водозливом; 6 – заспокоювач; 7 – скляний лоток; 8 – пристрій для виміру похилу; 9 – регульовані жалюзі; 10 – модельований пристрій.

Рисунок 2 – Схема стенду для проведення експерименту
Figure 2 – Diagram of the stand for conducting the experiment

Таблиця 1 – Результати виміру підпора і глибини на виході при різноманітних значеннях прогинів.

Table 1 – Results of measuring the support and depth at the outlet for various deflection values.

Верхніх		Нижніх	
f, см	*h*, мм	*f*, см	*h* (глибина), мм
0	183	0	239
4	210	4	232
2,4	202	2,4	238
1,4	194	1,4	238
0,7	190	0,7	239
0	183	0	239
-1,2	179	-1,2	239,5
-2,4	178	-2,4	241
-3,5	176,5	-3,5	247
-5,6	177	-5,6	245
$h_{дна}$=137 мм	Q=3,65 м^3/с	$h_{дна}$=222 мм	
Примітка: В таблиці 1.1 зі знаком "-" приведені значення прогинів труби до низу, зі знаком "+" – до верху.			

На основі даних (рис. 3) були побудовані графіки залежності підпору H від прогину труби (рис. 4).

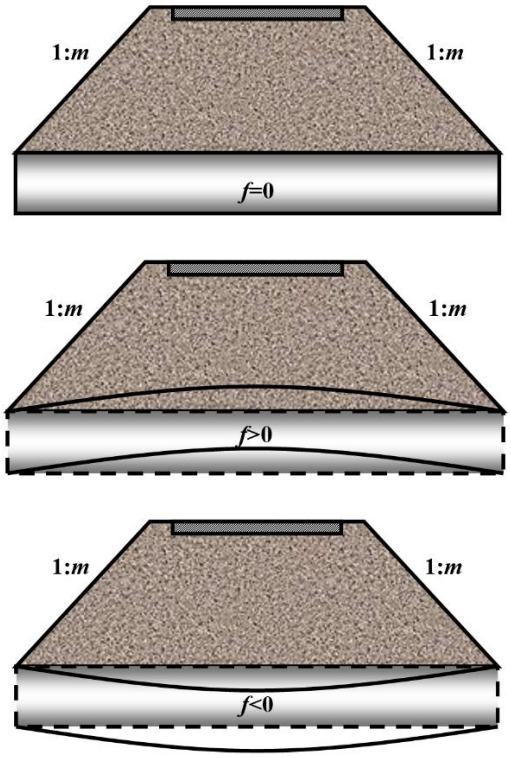


Рисунок 3 – Дослідження течії води в трубі в процесі її деформування

Figure 3 – Study of water flow in a pipe during its deformation

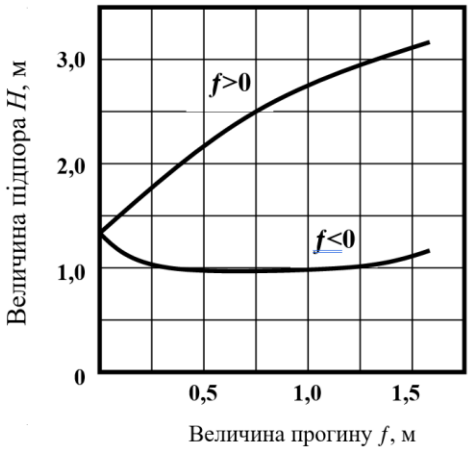


Рисунок 4– Графік залежності величини підпору від прогину

Figure 4 – Graph showing the dependence of the backwater height on the deflection

Із графіків видно, що підпір збільшується при прогині труби до верху. Значення підпору H_0=1,2 м. При прогині труби (f=1,5 м) підпір збільшився і став H=1,0 м, що складає 67%.

При прогині труби (f=0,5 м) до низу, підпір Н падає. Його значення складає Н=1,0 м. Подальший прогин труби до значення (f=1,25 м) не викликає зміну підпору в системі. І лише на ділянці прогину труби (f від 1,25 до 1,75 м) підпір повільно збільшується (H=1,25м).

При прогині труби до низу збільшується прямий похил біля вхідного оголовка. Швидкості на вході збільшуються, а значить збільшується пропускна здатність труби. Підпір падає. При прогині труби на ⅔d, режим протікання потоку в трубі змінюється. Приблизно на $^1/_2$ в трубі відбувається кавітація струменя і подальший прогин труби вірний результат не дає. При вивченні руху потоку в трубі при прогині ⅔ d необхідно враховувати кавітацію.

Висновки. Проведене фізичне моделювання підтвердило, що деформації системи «насип — труба — основа» є критичним фактором, який змінює розрахунковий гідравлічний режим роботи споруди.Встановлено, що прогин труби вгору (випор основи або нерівномірне осідання країв) спричиняє різке зростання рівня підпору. Зокрема, при прогині f = 1,5м (у масштабі натури) значення підпору зростає до 67%, що створює ризик переливу через гребінь насипу.Доведено, що помірний прогин труби донизу збільшує пропускну здатність за рахунок зростання місцевого похилу біля вхідного оголовка, що супроводжується падінням рівня підпору.Виявлено граничне значення деформації (близько 2/3d), при якому подальший прогин донизу призводить до виникнення кавітаційних явищ та розриву потоку, що робить стандартні гідравлічні залежності недійсними.Результати дослідження вказують на необхідність врахування можливих деформацій труби вже на стадії проектування, особливо для об’єктів, що зводяться на слабких ґрунтах або в умовах високих динамічних навантажень.

Перелік посилань

1. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування / Мінрегіонбуд України. — К. : ДП «Укрархбудінформ», 2009. — 151 с.

2. Перешивкін С. І. Гідравліка : навч. посіб. / С. І. Перешивкін. — К. : Національний транспортний університет, 2013. — 216 с.

3. Славінська О. М. Проектування водовідводу з автомобільних доріг : навч. посіб. / О.М. Славінська. — К. : НТУ, 2011. — 248 с.

4. Рябенко О. А. Гідравліка : підручник / О. А. Рябенко. — Рівне : НУВГП, 2011. — 445 с.

5. ДСТУ 8746:2017. Труби водопропускні залізобетонні круглі для автомобільних доріг і залізниць. Технічні умови. — К. : ДП «УкрНДНЦ», 2018. — 34 с.

6. Большаков В. А., Курганович А. А. Гідрологічні та гідравлічні розрахунки малих дорожніх споруд. – Київ: Вища школа, 1983. – 279 с.

7. Безуглий А. О. Методи оцінки експлуатаційного стану водопропускних споруд на автомобільних дорогах / А. О. Безуглий // Дороги і мости. — 2021. — Вип. 24. — С. 15–28.

8. Chaudhry M. H. Open-Channel Flow / M. H. Chaudhry. — 2nd ed. — New York : Springer, 2008. — 561 p. (Міжнародне авторитетне видання з гідравліки відкритих потоків).

9. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. — 9th ed. — Washington, DC : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020. (Міжнародний стандарт щодо проектування споруд, включаючи водопропускні труби).

10. Чечуга О.С., Каськів 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.

11. Чечуга О.С., Каськів В.І., Лисенко О.П., Лисенко А.М. Аналіз існуючих теоретичних методів визначення навантажень, які діють на водопропускні труби в земляному полотні автомобільних доріг. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 117.2. НТУ, Київ, 2025. С.87 – 96. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.2/87.pdf.

12. МР В.2.3-37641918-932:2023 Методичні рекомендації з проєктування водопропускальних труб на автомобільних дорогах загального користування.

RESEARCH OF HYDRAULIC PROCESSES IN WATER PASSAGE STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT DYNAMIC CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE OF THE COMPLEX “EMBANKMENT — CULVERT — FOUNDATION”

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*

Oleksndr Tokin P., Ph.D., Associate Professor, National Transport University, Professor of Production, Repair and Materials Science Department, e-mail:*a2atp@meta.ua*,tel (044) 280-42-59, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovich Pavlenko str. 1, of. 322, *https//orcid.org/0000-0002-7353-4228*

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.*

Summary. The article presents the results of experimental studies regarding hydraulic processes in culverts under conditions of varying stress-strain states. The main flow regimes—free-flow, semi-pressure, and full-pressure—are examined, and the conditions for their occurrence are defined. Particular attention is devoted to the physical modeling of the interaction within the "embankment – pipe – foundation" system at the National Transport University (NTU) hydraulics laboratory, utilizing Newton and Froude similarity criteria. The dependence of the water head (H) on pipe deformations (deflections) has been experimentally established. It was revealed that upward pipe deflection leads to a significant increase in the water head (up to 67%), whereas downward deflection initially promotes an increase in discharge capacity. The obtained data allow for the consideration of dynamic changes in structure geometry when evaluating its hydraulic efficiency.

Keywords: culverts, hydraulic regimes, stress-strain state, physical modeling, Froude criterion, pipe deflection, discharge capacity, pipe, cavitation..

References

1. DBN V.2.3-22:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannia [Transport structures. Bridges and pipes. Basic design requirements]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.

2. Pereshyvkin, S. I. (2013). Hidravlika: navch. posib. [Hydraulics: Tutorial]. Kyiv: National Transport University.

3. Slavinska, O. M. (2011). Proektuvannia vodovidvodu z avtomobilnykh dorih: navch. posib. [Designing road drainage: Tutorial]. Kyiv: NTU.

4. Riabenko, O. A. (2011). Hidravlika: pidruchnyk [Hydraulics: Textbook]. Rivne: NUWMPE.

5. DSTU 8746:2017. Truby vodopropuskni zalizobetonni kruhli dlia avtomobilnykh dorih i zaliznyts. Tekhnichni umovy [Reinforced concrete circular culverts for highways and railways. Specifications]. Kyiv: SE "UkrNDNC".

6. Bolshakov, V. A., & Kurhanovych, A. A. (1983). Hidrolohichni ta hidravlichni rozrakhunky malykh dorozhnikh sporud [Hydrological and hydraulic calculations of small road structures]. Kyiv: Vyshcha Shkola.

7. Bezuglyi, A. O. (2021). Metody otsinky ekspluatatsiinoho stanu vodopropusknykh sporud na avtomobilnykh dorohakh [Methods for assessing the operational state of culverts on highways]. Dorohy i mosty [Roads and Bridges], 24, 15–28.

8. Chaudhry, M. H. (2008). Open-Channel Flow (2nd ed.). New York: Springer.

9. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. (2020). 9th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

10. Chechuha, O. S., Kaskiv, V. I., Lysenko, O. P., & Lysenko, A. M. (2011). Deformatsii, yaki vyznachaiutsia umovamy statychnoi roboty truby v konstruktsii “nasyp – truba – osnova” [Deformations determined by the static operating conditions of the pipe in the "embankment – pipe – foundation" structure]. Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo [Motorways and Road Construction], 82, 173–180.

11. Chechuha, O. S., Kaskiv, V. I., Lysenko, O. P., & Lysenko, A. M. (2025). Analiz isniuiuchykh teoretychnykh metodiv vyznachennia navantazhen, yaki diiut na vodopropuskni truby v zemlianomu polotni avtomobilnykh dorih [Analysis of existing theoretical methods for determining loads acting on culverts in the roadbed of motorways]. Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo [Motorways and Road Construction], 117.2, 87–96.

12. MR V.2.3-37641918-932:2023. Metodychni rekomendatsii z proiektuvannia vodopropuskalnykh trub na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia [Methodological recommendations for the design of culverts on public motorways].