

УДК 625.7/.8, 625.745.1/.2

ПІДХОДИ З РОЗРАХУНКУ ГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОПРОПУСКНИХ СПОРУД З МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИЙ ЕЛЕМЕНТІВ

М.В. Гаркуша¹

¹доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua

¹Національний транспортний університет, Київ, Україна

Анотація. У роботі розглядаються підходи з розрахунку гідравлічних характеристик водопропускних споруд з металевих гофрованих конструкцій методом скінченний елементів. Застосування комп'ютерних програм є засобом, за допомогою якого проектувальник може приблизно визначити, яка конструкція водопропускної споруди є життєздатною в даній ситуації, визначивши ефективність існуючих водопропускних споруд і визначити їх гідравлічні характеристики та змоделювати розсіювання енергії води, для визначення розмиву води на виході з водопропускної споруди.

Ключові слова: гідравлічна характеристика, водопропускна споруда, металеві гофровані конструкції, метод скінченних елементів, проектування.

APPROACHES TO CALCULATING THE HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF WATERPROOFING STRUCTURES MADE OF METAL CORRUGATED STRUCTURES USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Mykola Harkusha¹

¹ Ph.D., Associate Prof., Department of Bridges, Tunnels and Hydrotechnical Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua

Abstract. The paper examines approaches to calculating the hydraulic characteristics of culverts made of corrugated metal structures using the finite element method. The use of computer programs is a means by which the designer can approximately determine which culvert design is viable in a given situation, determining the efficiency of existing culverts and determining their hydraulic characteristics and modeling the dissipation of water energy to determine the water erosion at the outlet of the culvert.

Keywords: hydraulic characteristics, culvert, corrugated metal structures, finite element method, design.

Вступ. Забезпечення належної роботи дорожніх водопропускних споруд з металевих гофрованих конструкцій є невід'ємною частиною проектування автомобільних доріг. Вибір підходів проектування дорожніх водопропускних споруд впливає на визначення основних деформаційних характеристик. А наявність надлишку води на проїзній частині негативно впливає на

фізико-технічні властивості матеріалів, з яких вона побудована, та потребує належного водовідведення, а неспроможність водопропускних споруд належного пропуску води спричинює ерозію дорожньої конструкції та ослаблення земляного полотна з подальшим руйнуванням всієї автомобільної дороги.

Мета роботи полягає в аналізі підходів з розрахунку гідравлічних характеристик водопропускних споруд з металевих гофрованих конструкцій методом скінченний елементів.

Матеріал і результат досліджень. Обчислювальна гідродинаміка (computational fluid dynamics — CFD) використовує числовий аналіз і структури даних для прогнозування та моделювання потоків. Код CFD платформи FLOW-3D є програмним пакетом, який використовувався для моделювання потоку завдяки його високій продуктивності та точності [1 — 4]. Цей код був відкалібрований, підтверджений і ефективно використовувався для моделювання та прогнозування водопропускних потоків і аналізу процесу розмиву вниз за течією з високою точністю [5 — 7]. FLOW-3D також було перевірено та використано для проектування гідравлічних конструкцій, що розсіюють енергію, таких як резервуари для заспокоєння, щоб зменшити ризик розмиву та ерозії в структурах випуску [3].

У програмному комплексі FLOW-3D використовується варіант нестисливої рідини з однією рідиною імітувати водну гладь. Для нестисливої в'язкої рідини руху використано тривимірне усереднене рівняння за Рейнольдсом Нав'є-Стокса (Reynolds-averaged Navier Stokes — RANS). Відповідне рівняння неперервності полягає в наступному [8]:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{DIF} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

де RDIF — турбулентна дифузія;

P — середній гідродинамічний тиск;

f_x, f_y і f_z — в'язкі прискорення;
 G_x, G_y і G_z — тіло прискорення;
 ρ — густина рідини;
 V_F — об'ємна частка;
 A_x, A_y і A_z — частки площі;
 x, y та z — декартові координати;
 u, v, w — компоненти швидкості.

Рух транспортування осаду (занесення, завислий стан, осідання та навантаження на пласт) було оцінено шляхом прогнозування процесу адвекції, ерозії та осадження за допомогою рівнянь, описаних Вей Г. та ін [9].

Метод об'єму рідини (volume of fluid — VOF) використовувався для застосування правильних граничних умов на межі розділу та відстеження межі розділу рідин через довільні деформації [6]. Гідродинамічний аналіз проводився на основі методології представлення двофазної площі/об'єму перешкод (FAVOR) [6, 10]. Цей метод дозволяє відстежувати межу розділу рідин через довільні деформації та застосовувати правильні граничні умови на межі розділу [6, 11].

У програмному комплексі OpenFOAM швидкість і тиск є важливими параметрами, які можна використовувати для порівняння [12].

Для розв'язування нестисливої в'язкої рідини використовуються рівняння двофазної течії нестисливої N-S рівняння (усереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса) [13]:

$$\nabla \times u = 0$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \times (\rho u u) - \nabla \times ((\mu + \mu_t) S) = -\nabla p + \rho g + \sigma K \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad (5)$$

де u — векторне поле швидкості;

p — поле тиску;

μ_t — турбулентна вихрова в'язкість;

α — функція об'ємної частки для двох рідин, визначена як:

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{об'єм, який займає повітря} \\ 1 & \text{об'єм, який займає вода} \end{cases};$$

S — тензор швидкості деформації, $S = \frac{1}{2} \nabla u + \nabla u^T$;

σ — поверхневий натяг;

K — кривизна поверхні.

Модель турбулентності виражена рівнянням транспорту для моделі $k-\omega$ SST [14]:

— кінематична вихрова в'язкість:

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1 w, SF_2)} \quad (6)$$

— кінетична енергія турбулентності:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_i)}{\partial x_i} = P_k - \beta^* \rho k w + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

— питома швидкість дисипації:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_i)}{\partial x_i} = \\ = \alpha S^2 - \beta \rho w^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_w \mu_t) \frac{\partial w}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{w2} \frac{1}{w} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial w}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (8)$$

де k — турбулентна кінетична енергія;

μ_t — коефіцієнт турбулентної в'язкості;

w — швидкість дисипації;

σ_{ij} — дельта Кронекера;

t_{ij} — тензор напруження Рейнольдса $\left[= \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \sigma_{ij} \right]$.

За допомогою методу скінченних елементів можливе моделювання водопропускальної труби в умовах вільного потоку та підпору за допомогою одного з найсучасніших програмних комплексів — Flow 3D [15], щоб продемонструвати концепцію контролю входу та випуску під час проектування водопропускальної труби. Може бути корисним мати більш точне розуміння проектування дорожньої водопропускальної труби, дивлячись на результати моделювання з переходами між керуванням входом і випуском. Це моделювання починається з імітації труби діаметром 1050 мм, на вході в водопропускальну трубу швидкість потоку $Q = 2,8 \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$.

Суть моделювання показує, що потік проходить через критичну глибину на вході в трубу з надкритичним потоком уздовж усієї труби (рис. 1), моделювання дає можливість підняти стіну - гасник (водобійну стінку) нижче за течією, що призводить до значного підпору, який занурює всю трубу (рис. 2). Цікаво спостерігати, що рівень верхньої води піднімається вгору,

оскільки його рівень тепер контролюється високим рівнем води на виході водопропускної труби (рис. 3).

Time: 2.48s

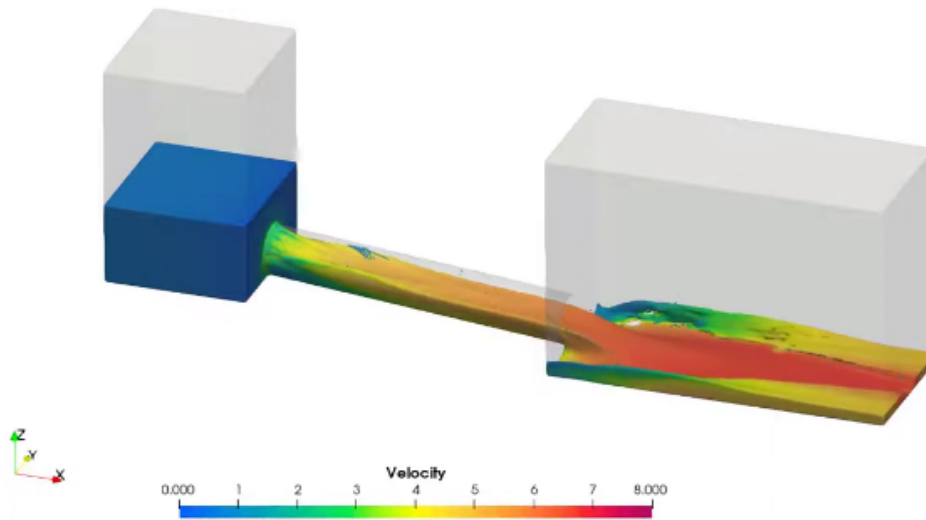


Рис. 1. – Початковий потік через водопропускну споруду

Time: 7.16s

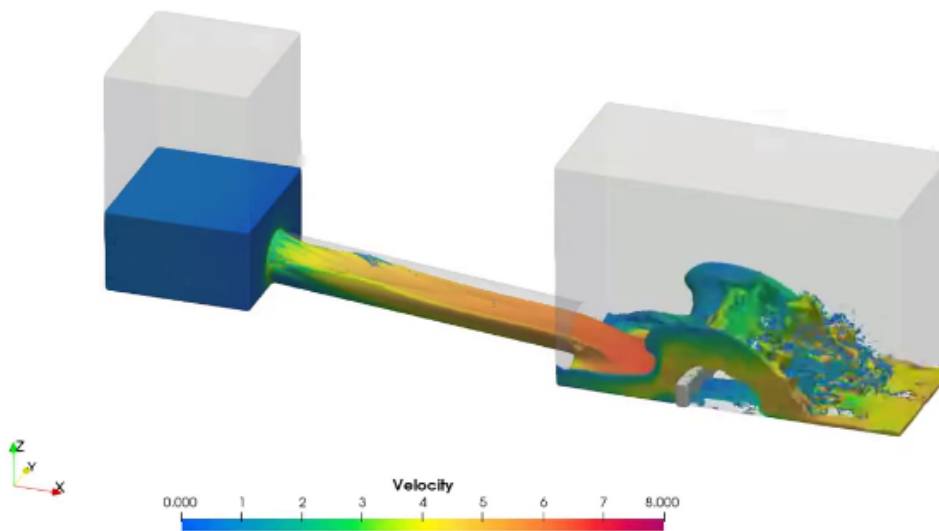


Рис. 2. – Підняття водобійної стінки нижче за течією

Time: 16.04s

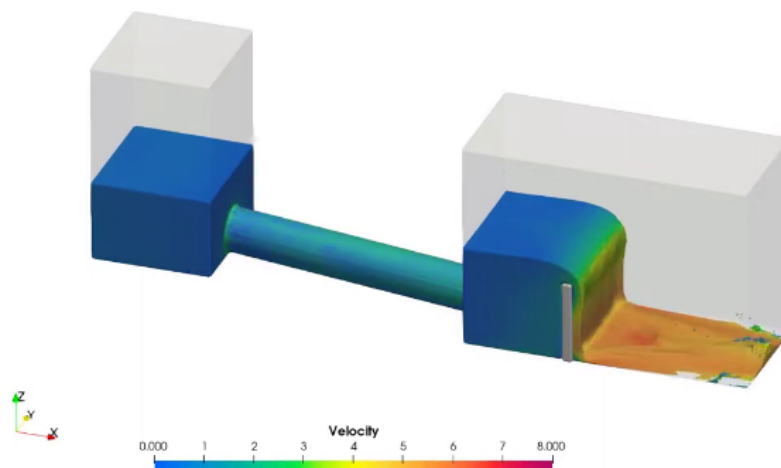


Рис. 3. – Значне підняття водобійної стінки нижче за течією

А потім відбувається опускання стіни-гасника (водобійної стінки), і потік знову повертається до початкового потоку. Наприкінці моделювання рівень води повертається приблизно до того самого рівня, що й на початку моделювання (рис. 4). Моделювання дає можливість візуалізувати перехід між двома механізмами управління потоком.

Time: 45.72s

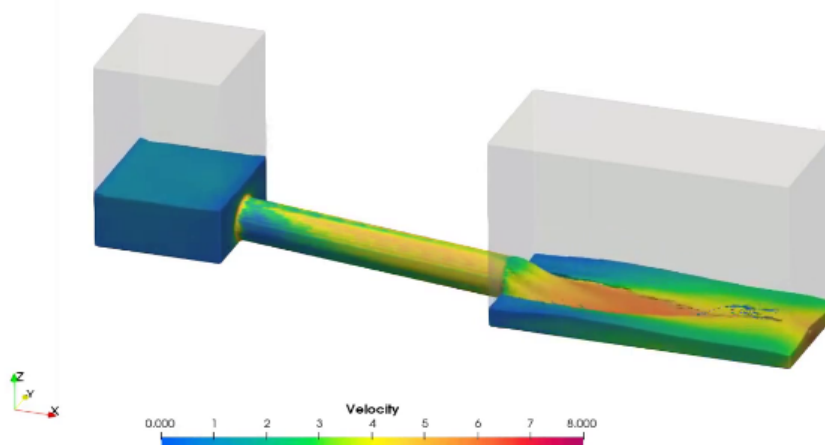


Рис.4. – Опускання водобійної стінки до початкового положення

Висновки. Сучасні програмні комплекси відіграють важливу роль у розробці нових дорожніх водопропускних споруд. Застосування програмних комплексів дає можливість змоделювати, перевірити моделі гідродинаміки, розмиву та транспортування осаду та використання їх для проекту-

вання. Це дає можливість забезпечити надійність дорожньої водопропускної споруди з прогнозування її поведінки під час експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kim D. G. (2007). Numerical analysis of free flow past a sluice gate. *KSCE J. Civ. Eng.* 11 (2): 127–132. <https://doi.org/10.1007/BF02823856>.
2. Kim S., K. Yu B. Yoon and Y. Lim (2012). A numerical study on hydraulic characteristics in the ice harbor-type fishway. *KSCE J. Civ. Eng.* 16 (2): 265–272. <https://doi.org/10.1007/s12205-012-0010-5>.
3. Mohammed S. R., B. K. Nile and W. H. Hassan (2020). Modelling stilling basins for sewage networks. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 671 (1): 012111. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012111>.
4. Olsen N. R. B. and G. Hillebrand (2018). Long-time 3D CFD modeling of sedimentation with dredging in a hydropower reservoir. *J. Soils Sediments* 18 (9): 3031–3040. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1989-0>.
5. Karimpour S., S. Gohari and M. Yasi (2020). Experimental and numerical investigation of blockage effects on flows in a culvert. *J. Hydraul.* 15 (2): 1–14. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.211670.1425>.
6. Taha N., M. M. El-Feky, A. A. El-Saiad, and I. Fathy. (2020). Numerical investigation of scour characteristics downstream of blocked culverts. *Alexandria Eng. J.* 59 (5): 3503–3513. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.05.032>.
7. Othman Ahmed K., A. Amini, J. Bahrami, M. R. Kavianpour, and D. M. Hawez (2021). Numerical modeling of depth and location of scour at culvert outlets under unsteady flow conditions. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 12 (4): 04021040. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000578](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000578).
8. Mostafazadeh-Fard, Saman & Samani, Zohrab (2023). Dissipating Culvert End Design for Erosion Control Using CFD Platform FLOW-3D Numerical Simulation Modeling. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice.* 14. 10.1061/JPSEA2.PSENG-1373.
9. Wei G., J. Brethour, M. Grünzner, and J. Burnham (2014). The sedimentation scour model in FLOW-3D. *Flow Science Rep.* No. 03-14. Santa Fe, NM: Flow Science Inc.
10. Hirt C. W., and B. D. Nichols (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.* 39 (1): 201–225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).
11. Flow Science, Inc. (2016). FLOW-3D version 11.2 user manual. Los Alamos, NM: Flow Science.
12. Zhang Ruike, J. Yee-chung & Wu, Peng (2019). NUMERICAL SIMULATION OF CULVERT FLOW USING OPENFOAM. 390-398. 10.3850/38WC092019-0168.
13. Liu X., and Garc'ia M. (2006). Numerical simulation of local scour with free surface and automatic mesh deformation. In *Proceedings of World Environmental and Water Resource Congress, Omaha, NE.*
14. Christopher J.G. (2017). OpenFOAM User Guide version 5.0. OpenFOAM Foundation Ltd, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported License.
15. Сторінка компанії FLOW3D. – Режим доступу: <https://www.flow3d.com/> (дата звернення: 24.03.2025).