

УДК 628.253.3: 532.533.5

Жук В. М., к.т.н.; Завойко Б. В.; Попадюк І. Ю., к.т.н.; Матлай І. І., к.т.н.; Пиць Х. М.
(Національний університет «Львівська політехніка», Львів, УКРАЇНА)

ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ПЕРЕПАДНОГО КАНАЛІЗАЦІЙНОГО КОЛОДЯЗЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ З КРИВОЛІНІЙНИМ ВХІДНИМ ПАТРУБКОМ

У статті наведені результати експериментального визначення пропускної здатності фізичної моделі перепадного каналізаційного колодязя нової конструкції, влаштованого у циліндричному корпусі з водобійним прямком та з криволінійним вхідним патрубком, виконаним у формі водозливу практичного профілю.

Ключові слова: перепадний колодязь, пропускна здатність, водобійний прямок.

Вступ. Аналіз статистичної звітності щодо характеристик водовідвідних мереж у населених пунктах України свідчить про їх критичний стан. Згідно з офіційними даними на кінець 2013 року 36,4% каналізаційних мереж знаходилися в поганому чи аварійному стані [1], тоді як на кінець 2011 р. цей показник становив 35,7%, що свідчить про подальше погіршення ситуації в цьому секторі водопровідно-каналізаційного господарства.

Важливим елементом самопливної водовідвідної мережі є перепадні колодязі, які дозволяють транспортувати стічні води трубопроводами і колекторами з допустимими швидкостями, не збільшуючи заглиблення мережі. Для ділянок водовідвідних мереж великого діаметру перепадні колодязі являють собою відповідальні технічні споруди, які працюють в умовах негативного впливу агресивного середовища та під дією значних динамічних навантажень.

Аналіз останніх досліджень. Традиційні конструкції перепадних колодязів, наприклад, наведені в ТП 902-09-46.88 [2], являють собою габаритні залізобетонні споруди, особливо у випадках встановлення їх на трубопроводах великих діаметрів. Будівництво таких перепадних колодязів є капіталомістким і особливо трудозатратним: влаштування монолітної залізобетонної споруди, часто на глибинах до 10–12 м від рівня землі, у багатьох випадках необхідність паралельно з моноліченням виконувати водопониження до набуття бетоном проектної міцності. Будівництво колекторів великого діаметра з влаштуванням таких перепадних колодязів також вимагає великих витрат часу, оскільки часто продовження прокладання колектора можливе лише після завершення будівництва перепадної споруди.

Для водовідвідних мереж великих діаметрів ДБН В.2.5-75:2013 [3] рекомендує, що "перепади висотою до 3 м на трубопроводах діаметром 600 мм і більше можна виконувати у вигляді водозливів практичного профілю". Таким чином, враховуючи складність питання та наявність у кожному окремому випадку багатьох часткових факторів, чинний нормативний документ не забороняє використання перепадних колодязів інших типів та конструкцій.

На сьогоднішній день виробниками запропоновано ряд нових конструкційних рішень перепадних колодязів, що відповідають вимогам мінімізації затрат коштів та часу на їх будівництво. Основними задачами при проектуванні таких колодязів є забезпечення пропускної здатності та умов гасіння напору потоку рідини, що має вагоме практичне значення при впровадженні нових конструкційних рішень цих споруд.

У роботі виконано дослідження нової конструкції перепадного колодязя, розробленої фахівцями Корпорації "Енергоресурс-Інвест" (рис. 1). Перепадний колодязь з водобійним прямком влаштовується у циліндричному пластиковому корпусі з зовнішньою залізобетонною обоймою. Вхідний патрубок колодязя, з'єднаний з підвідним трубопроводом такого ж діаметра, виконується криволінійним, за формою водозливу практичного профілю.

Оскільки при гасінні напору в перепадному колодязі запропонованої конструкції виникає складний просторовий гідравлічний стрибок у нециліндричному руслі [4], аналітичний розрахунок гідравлічних параметрів потоку крізь таку споруду є достатньо проблематичним і обов'язково повинен бути експериментально верифікований.

Метою роботи є експериментальне визначення пропускної здатності фізичної моделі перепадного каналізаційного колодязя нової конструкції, влаштованого у циліндричному корпусі з водобійним приямком та з криволінійним вхідним патрубком, виконаним у формі водозливу практичного профілю.

Гідравлічний розрахунок перепадних колодязів полягає у визначенні розмірів споруди, необхідних для максимально ефективного гасіння надлишкового напору рідини, зумовленого перепадом, а також у встановленні витратної гідравлічної характеристики споруди, як залежності між глибиною рідини в колодязі та об'ємною витратою потоку. Вагомий внесок у вирішення цієї проблеми зробили Г. Аманжолов, Е. Замарин, С. Колобанов, А. Угинчус, М. Чертоусов, Ю. Шутов та ін. [4–7].

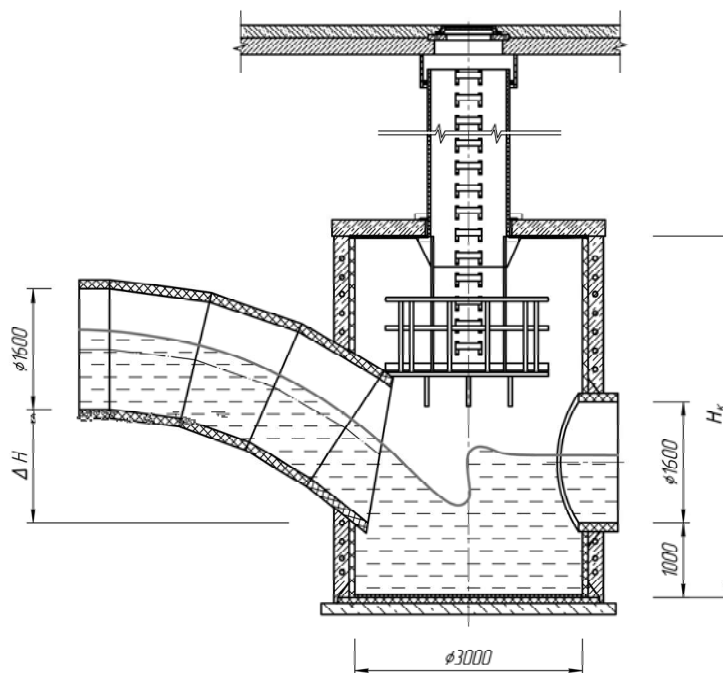


Рис. 1. Схема перепадного каналізаційного колодязя конструкції Корпорації "Енергоресурс-Інвест" з діаметром корпусу $D_k=3,0$ м

Гідравлічний розрахунок перепадних колодязів практичного профілю виконують за формулами спряження б'єфів. Найкращою формою спряження б'єфів у перепадному колодязі є затоплений гідравлічний стрибок, який ефективно гасить надлишкову енергію на перепаді, забезпечує максимальну рівномірність руху рідини у відповідному трубопроводі та мінімізує абразивну дію потоку на його дно.

Затоплений гідравлічний стрибок має місце, якщо виконується умова

$$t \geq (h_2 - a_0), \quad (1)$$

де t – глибина потоку у відповідному трубопроводі; h_2 – друга спряжена глибина гідравлічного стрибка; a_0 – теоретична глибина водобійного приямка (рис. 2).

Глибину водобійного колодязя визначають за формулою:

$$d_k = \sigma a_0 + (\sigma - 1)t = \sigma h_2 - t, \quad (2)$$

де $\sigma=(1,05-1,1)$ – коефіцієнт, що характеризує ступінь затоплення стрибка.

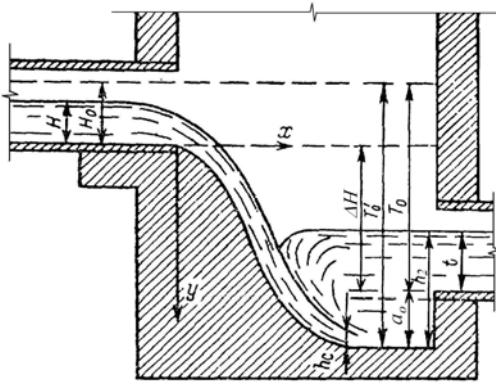


Рис. 2. Схема до гідравлічного розрахунку перепадного колодязя водозливного типу з водобійним прямком

Довжина водобійного колодязя для невеликих споруд:

$$L_k = L_c + L_{2.c}, \quad (5)$$

де L_c – довжина від стінки падіння до стисненого перерізу; $L_{2.c}$ – довжина гідравлічного стрибка.

Відстань від стінки падіння до стисненого перерізу:

$$L_c = V_n \sqrt{(2\Delta H + H)/g}, \quad (6)$$

де H , V_n – відповідно глибина та середня швидкість на підході до перепаду; ΔH – висота перепаду, тобто різниця позначок лотків підвідної та відвідної труби.

Довжину гідравлічного стрибка в прямокутному руслі найчастіше визначають за формулами:

М. Павловського: $L_{2.c} = 2,5 \cdot (1,9h_2 - h_1), \quad (7)$

М. Чертоусова: $L_{2.c} = 10,3h_1 \cdot (\sqrt{Fr_1} - 1)^{0,81}, \quad (8)$

С. Ткачука: $L_{2.c} = \frac{4\eta(\eta+1)}{\eta-1} \frac{V_2^2}{2g}, \quad (9)$

де h_1 , h_2 – спряжені глибини; $\eta = h_2/h_1$; Fr_1 – значення критерію Фруда у першому перерізі; V_2 – середня швидкість після стрибка.

Потрібно зазначити, що формули (7)–(9) справедливі лише для каналів прямокутного поперечного перерізу.

Удосконаленню конструкції та методики гідравлічного розрахунку перепадних колодязів присвячена дисертаційна робота Г. Аманжолова [5]. Виконаний у цій роботі аналіз показав, що "формули для визначення довжини водобійного колодязя Колобанова С.К., Масленнікова Н.А. та ін. дають занижені результати", довжину водобійного колодязя автор рекомендував визначати за формулою М. Чертоусова.

Складність гідравлічних явищ, які мають місце в перепадних колодязях, зумовлюють актуальність подальших експериментальних досліджень. Одне з останніх таких досліджень, виконане італійськими дослідниками R. Padulano, G. Del Giudice, A. Carravetta, стосується вивчення гідравлічних характеристик різних типів течії крізь вентилявані та невентильовані перепадні колодязі шахтного типу [8].

Перевагою нової конструкції перепадного колодязя, наведеної на рис. 1, є суттєве зменшення довжини споруди за рахунок того, що довжина падіння струменя L_c виноситься за межі колодязя. Разом з тим, кругла форма перепадного колодязя в плані ускладнює його

Теоретична глибина водобійного напрямка, при якій стрибок встановлюється у стиснутому перерізі, визначається розв'язанням системи двох рівнянь – збереження енергії та кількості руху:

$$T_0 + a_0 = h_c + \frac{\alpha Q^2}{2g\varphi^2\omega_c^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega_c} + \omega_c z_c = \frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega_2} + \omega_2 z_2, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт кінетичної енергії; α_0 – коефіцієнт кількості руху; φ – коефіцієнт швидкості; ω_c , ω_2 – площа живого перерізу потоку відповідно у стисненому перерізі та за стрибком (при глибині h_2); z_c , z_2 – висота розташування центру живого перерізу відносно дна колодязя відповідно у стисненому перерізі та за стрибком.

теоретичний гідравлічний розрахунок і робить необхідними відповідні експериментальні дослідження.

Методика досліджень. Враховуючи, що для течії в перепадному колодязі домінуючими є сили тяжіння, за основний критерій гідродинамічної подібності прийнято критерій Фруда:

$$Fr = V^2 / gL, \quad (10)$$

де V – середня швидкість потоку рідини в трубопроводі; L – характерний лінійний розмір живого перерізу потоку; для труб круглого перерізу $L = h_z$, де h_z – гідравлічна глибина.

Для забезпечення подібності за критерієм Фруда при лінійному масштабі моделі C_L масштаб середньої швидкості дорівнює $C_V = (C_L)^{0,5}$, масштаб об'ємної витрати – $C_Q = (C_L)^{2,5}$, а масштаб втрат напору, висот та напорів дорівнює геометричному масштабу: $C_z = C_H = C_L$.

З дотриманням гідродинамічної подібності явищ у натурному та модельному перепадному колодязях обґрунтовано лінійний масштаб фізичної моделі $C_L = 10$. Модель виконана з поліетилену відповідно до розмірів натурального перепадного колодязя (рис. 1) в масштабі 1:10. Висота модельного колодязя – $H_{к,м} = 46$ см, діаметр – $D_{к,м} = 30$ см, висота перепаду – $\Delta H_m = 22,5$ см, глибина водобійної частини – $a_m = 10$ см. Внутрішній діаметр відвідної труби на моделі $d_m = 154$ мм, а її позовжній уклон – $i = 0,01$.

Об'ємну витрату води визначали за допомогою прямокутного водозливу з тонкою стінкою, встановленого в оголовку лотка. Об'ємну витрату води обчислювали за формулою:

$$Q = m_e b_e \sqrt{2g H_e^{3/2}}, \quad (11)$$

де H_e – напір над порогом мірного водозливу, який вимірювали за допомогою голчастого рівнеміра; b_e – ширина водозливного отвору мірного водозливу, $b_e = 202$ мм; m_e – коефіцієнт витрати мірного водозливу, який визначали за формулою Базена як для водозливу без бічного стиснення

$$m_e = \left(0,405 + \frac{0,003}{H_e} \right) \left(1 + 0,55 \frac{H_e^2}{(H_e + P_e)^2} \right), \quad (12)$$

де P_e – висота порога водозливу, $P_e = 420$ мм.

Висоту наповнення модельного перепадного колодязя визначали мірною лінійкою у трьох характерних точках: по центру колодязя (z_{K1}), біля бічної стінки (z_{K2}) та в точці приєднання відвідного трубопроводу (z_{K3}). Зважаючи на бурхливий стан потоку при великих витратах стічної води, значення глибин $z_{K,i}$ приймалися як середні між найбільшими та найменшими у кожному досліді. Абсолютна похибка вимірювання глибин у перепадному колодязі не перевищувала $\pm 1,0$ см.

Наповнення відвідного трубопроводу вимірювали голчастим рівнеміром у двох перерізах – на початку та в кінці відвідної труби.

Результати експериментальних досліджень. Загалом виконано 26 серій експериментальних досліджень з діапазоном зміни об'ємної витрати потоку на фізичній моделі $Q_m = 0,67 - 36,9$ л/с, що відповідає натурним витратам $Q_n = 0,21 - 11,7$ м³/с.

З дотриманням законів гідродинамічної подібності експериментальні результати, отримані на фізичній моделі перепадного колодязя, перераховано на натурні умови. За результатами експериментальних досліджень отримано графічні залежності глибини наповнення перепадного колодязя відносно його дна (рис. 3), а також залежності глибини наповнення на початку та в кінці відвідного трубопроводу від об'ємної витрати потоку рідини (рис. 4).

Залежність глибини наповнення перепадного колодязя $z_{к,н}$ від об'ємної витрати рідини з достатньо високим ступенем точності ($R^2 = 0,978$) описується степеневою залежністю:

$$z_{к,н} = 2,2 \cdot Q_n^{0,29}. \quad (13)$$

На рис. 3 вказані планки відносних похибок по осі $z \pm 5\%$, що також підтверджує достовірність апроксимаційної залежності (13).

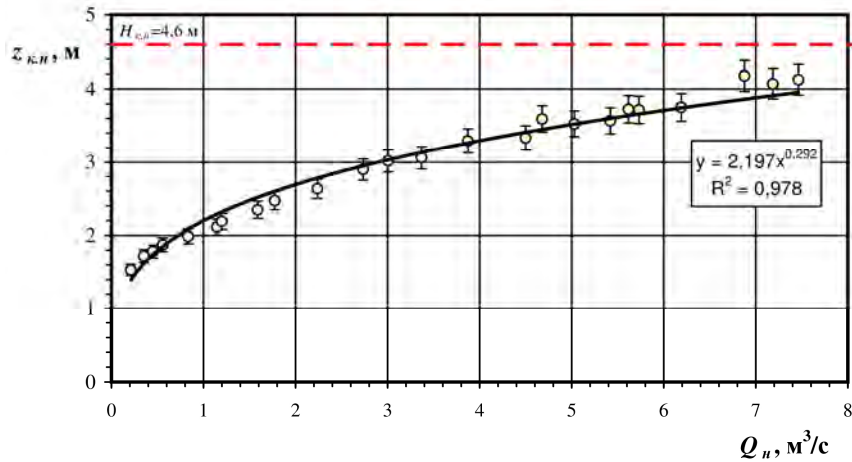


Рис. 3. Залежність глибини наповнення перепадного колодязя досліджуваної конструкції від об'ємної витрати потоку рідини ($D_{к,н}=3,0$ м; $\Delta H_H=2,25$ м; $a_H=1$ м; $d_H=1,54$ м; перерахунок з фізичної моделі $C_L=10$)

Переповнення модельного перепадного колодязя спостерігалось при витраті $Q_M=27,1$ л/с і більше, що відповідає натурній витраті $Q_H=8,57$ м³/с. Максимальна зафіксована в досліді витрата, при якій колодязь ще не переповнювався, – $Q_M = 23,60$ л/с ($Q_H = 7,47$ м³/с).

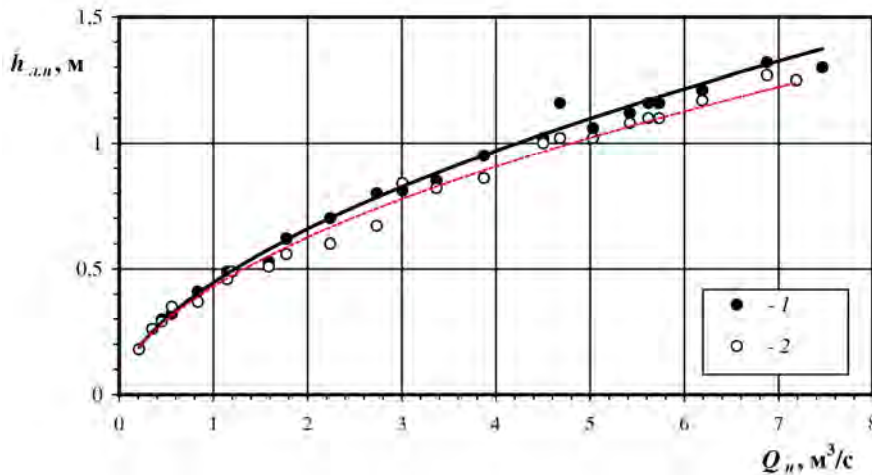


Рис. 4. Залежності глибини наповнення відвідного трубопроводу перепадного колодязя від об'ємної витрати потоку рідини: 1, 2 – відповідно на початку та в кінці відвідного трубопроводу ($D_{к,н}=3,0$ м; $\Delta H_H=2,25$ м; $a_H=1$ м; $d_H=1,54$ м; перерахунок з фізичної моделі $C_L=10$)

Залежності глибини потоку на початку та в кінці відвідного трубопроводу діаметром $d_H=1,54$ м від об'ємної витрати описуються відповідно степеневими залежностями (14) і (15):

$$h_{л1н} = 0,45 \cdot Q_n^{0,56}; \quad (14)$$

$$h_{л2н} = 0,43 \cdot Q_n^{0,54}. \quad (15)$$

Як видно з рис. 4, глибина води на початку відвідного трубопроводу дещо більша, ніж в його кінці, що є непрямым підтвердженням наявності підтопленого гідралічного стрибка у колодязі.

Висновки.

У роботі виконано експериментальні дослідження гідралічних характеристик фізичної моделі перепадного колодязя нової конструкції, характерними особливостями якої є кругла форма колодязя в плані, наявність водобійного приямка та підвід рідини по криволінійному вхідному патрубку.

Пропускную здатність натурального перепадного колодязя з діаметром в плані 3 м, висотою робочої камери 4,6 м, висотою перепаду 2,25 м та внутрішнім діаметром підвідного і відвідного трубопроводів 1540 мм досліджено на геометрично подібній моделі, виконаній в масштабі 1:10.

Отримано експериментальні залежності висоти наповнення перепадного колодязя та відвідного трубопроводу від об'ємної витрати потоку рідини. Переповнення модельного перепадного колодязя спостерігалось при витраті $Q_m = 27,1$ л/с і більше, що відповідає натурній витраті $Q_n = 8,57$ м³/с. Максимальна зафіксована в досліді витрата, при якій колодязь ще не переповнювався, – $Q_m = 23,6$ л/с ($Q_n = 7,47$ м³/с).

1. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2013 році // Державна служба України з надзвичайних ситуацій. – К., 2014. – 542 с.
2. Типовые материалы для проектирования 902-09-46.88. Альбом V. Камеры перепадные для труб $dy=300-1600$ мм. – М., 1989. – 46 с.
3. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – К. : Мінрегіонбуд України, 2013. – 128 с.
4. Справочник по гидравлике / Под ред. В. А.Большакова. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1984. – 343 с.
5. Аманжолов Г. М. Разработка и совершенствование конструкции и методики расчета перепадных колодцев / Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04. – М., 1984.
6. Воронов Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод. // Ю. В. Воронов, С. В. Яковлев. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 704 с.
7. Курганов А. М. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации // А. М. Курганов, Н. Ф. Федоров. – Л. : Стройиздат, 1973. – 408 с.
8. Padulano R. Experimental analysis of a vertical drop shaft / R. Padulano, G. Del Giudice, A. Carravetta // Water. – 2013. – N. 5. – P. 1380–1392.

Рецензент: д.т.н., професор Орлов В. О. (НУВГП)

Zhuk V. M., Candidate of Engineering, Zavoiko B. V., Popadiuk I. Y., Candidate of Engineering, Matlai I. I., Candidate of Engineering, Pyts K. M.

(Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE)

FLOW CAPACITY OF PHYSICAL MODEL OF CYLINDRICAL SEWER DROP MANHOLE WITH CURVED INLET

The results of experimental investigation of the flow capacity of physical model of cylindrical sewer drop manhole with energy dissipating pit and with curved inlet, arranged in the form of ogee spillway, are presented in the paper.

Keywords: drop manhole, flow capacity, energy dissipating pit.

Жук В. М., к.т.н.; Завойко Б. В.; Попадюк І. Ю., к.т.н.; Матлай І. І., к.т.н.; Пыць Х. М. (Национальный университет «Львовская политехника», Львов, УКРАИНА)

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕПАДНОГО КАНАЛИЗАЦИОННОГО КОЛОДЦА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С КРИВОЛИНЕЙНЫМ ВХОДНЫМ ПАТРУБКОМ

В статье приведены результаты экспериментального определения пропускной способности физической модели перепадного канализационного колодца новой конструкции, устроенного в цилиндрическом корпусе с водобойным приемком и с криволинейным входным патрубком, выполненным в форме водослива практического профиля.

Ключевые слова: перепадной колодец, пропускная способность, водобойный приемок.