

АЛГОРИТМ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ФОНТАНІВ

Запропоновано алгоритм гідравлічного розрахунку фонтанів. Проаналізовано та систематизовано формули для визначення напору на насадках, а також геометричних параметрів похилих фонтанних струменів. Цю інформацію використовують для того, щоб вибрати типорозміри насосів під час проектування фонтанів. Встановлено, що на сьогодні українські та закордонні виробники випускають багато типорозмірів перетворювачів частоти електричного струму, які мають високі коефіцієнти корисної дії. З перетворювачами частоти електричного струму використовують насоси з трифазними двигунами, а також насоси з вмонтованими перетворювачами частоти.

Ключові слова: фонтан, гідравлічний розрахунок, струмінь, напір, вибір насосу.

Вступ. У сучасному світі фонтани є не тільки прикрасою парків, скверів та дворових ділянок, але й виконують функцію покращення санітарно-гігієнічних умов – вони зволожують повітря і частково очищують його від пилу. Під час вибору того чи іншого типу фонтану враховують місце його розташування, рельєф, навколишню забудову. Це дає змогу ув'язати побудований фонтан із загальним комплексом архітектурної композиції.

Останніми роками простежується тенденція до будівництва фонтанів малих розмірів – на території пасажів торговельно-розважальних комплексів, приватних замських садибних ділянках, всередині великих приміщень. У таких випадках особливу увагу варто приділяти не тільки елементам декору фонтану, але й формі струминних композицій.

Огляд спеціальної літератури. Під час розрахунку фонтанних струменів і конструюванні насадок основною метою є досягнення максимального художнього ефекту за мінімальної витрати води. Всі гідравлічні розрахунки в процесі проектування фонтанів полягають у визначенні витрат води, діаметрів труб і потрібних напорів на вході в насадки для підбору насосного обладнання.

Варто зазначити, що з 50-х років ХХ ст. спеціальних теоретичних та практичних розробок у галузі розрахунку фонтанних струменів не опубліковано. На практиці розрахунок фонтанних струменів виконують за відомими формулами Люгера, Фрімана, Лобачова, роботи яких найповніше висвітлено та узагальнено у літературі [1-3]. Однак під час розрахунку параметрів струменів за формулами [3] ми встановили певну невідповідність отриманих числових значень очевидній фізичній картині явища.

Наприклад, струмінь, який б'є з насадки, нахиленої до горизонту, буде описувати траєкторію, яка дещо відрізняється від параболи. Основні параметри цієї траєкторії – горизонтальна проекція висхідної частини струменя l_1 , низхідної частини l_2 і висота h , які залежать від напору на насадці і кута нахилу її до горизонту α . Значення цих величин обчислюють за формулами: $l_1 = B_1H$; $l_2 = B_2H$; $h = B_3H$, де H – напір на насадці, B_1 , B_2 , B_3 – коефіцієнти, які для різних кутів нахилу насадки приймають з табл. 90 [3]. Внаслідок підставлення чисельних значень отримуємо l_1 менше l_2 , що суперечить експериментальним даним, за якими l_1 більше l_2 . Крім цього, наведені коефіцієнти не залежать від діаметрів насадок, хоча, як відомо з практики пожежогасіння, між ними є прямий зв'язок (зі збільшенням діаметра насадки довжина бою струменя збільшується).

Для вертикального струменя (при $\alpha = 90^\circ$) значення коефіцієнту B_3 відсутні, хоча в цьому випадку справедливою є формула Люгера.

Постановка завдання. Завданням роботи є систематизація та аналіз відомих даних з метою розроблення алгоритму та методики гідравлічних розрахунків фонтанів, а також встановлення залежностей для визначення основних параметрів похилих струменів: горизонтальної дальності, найбільшої висоти, теоретичного напору, напору на вході у насадку.

Основний матеріал дослідження. Гідравлічний розрахунок фонтанів пропонуємо виконувати за таким алгоритмом.

1. Завдання гідравлічного розрахунку. Перед гідравлічним розрахунком фонтанів дизайнер задає їхню геометричну форму, напрям струменів (вертикальний, похилий під певним кутом), розташування струменів у басейні, висоту вертикальних струменів, горизонтальну дальність і висоту похилих струменів, діаметр і кількість насадок.

Завданням гідравлічного розрахунку є визначення витрати води (Q) через насадку (або групи насадок) і потрібного напору (H_n), тобто напору, який потрібний для подачі води насосом. Потрібний напір складається з суми висоти встановлення насадки відносно рівня води в басейні, напору перед насадками і втрат напору в трубопроводі, який з'єднує насос з насадками. Визначені параметри Q і H_n є основою для вибору марки насосу. Один насос може подавати воду на один струмінь, групу струменів або на кілька груп струменів. Визначення діаметрів труб та раціональних схем під'єднання насосів до насадок (груп насадок) також належить до гідравлічного розрахунку.

Наведений нижче розрахунок базується на основі робіт [1, 2] та виконаних замінах та доповненнях.

2. Витрата води. Витрату води в м³/с через одну насадку визначають за формулою

$$Q_n = \frac{\pi d_n^2}{4} \sqrt{2gH} = 3,48 d_n^2 \sqrt{H}, \quad (1)$$

де: d_n – діаметр насадки в метрах; H – теоретичний напір (теоретична висота струменя) в метрах, який дорівнює швидкісному напору $v^2/(2g)$; v – швидкість води на виході з насадки,

$$\text{м/с, } \frac{\pi}{4} \sqrt{2g} = \frac{3,14}{4} \sqrt{2 \cdot 9,81} = 3,48.$$

Витрата води в трубопроводі дорівнює сумі витрат через всі насадки частини фонтана. Частини фонтана вибирають так, щоби витрата води в кожній з них забезпечувалася подачею від одного насоса. Іноді доцільно використати два насоси, які з'єднують паралельно.

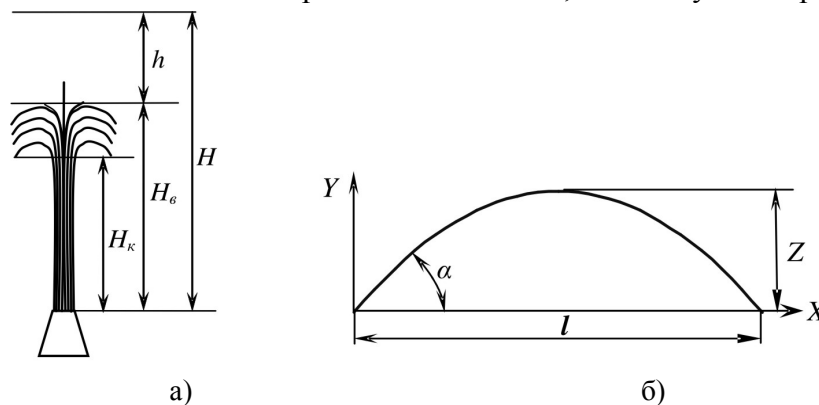


Рис. 1. Схема вертикального (а) похилого (б) струменя: H – теоретична висота; h – втрата висоти через тертя між водою і повітрям; H_e – висота вертикального струменя; H_k – висота компактної частини струменя

3. Вертикальні струмені. Для вертикальних струменів (рис. 1, а) теоретичну висоту визначають за формулою Люгера [1]

$$H = \frac{H_e}{1 - \varphi H_e}, \quad (2)$$

де: H_e – висота вертикального струменя, $\varphi = \frac{0,25}{d_\phi + (0,1d_\phi)^3}$ – коефіцієнт, який враховує втрату

висоти струменя h внаслідок тертя між ним і повітрям, d_n – діаметр насадки в міліметрах.

4. Похилі струмені. Траєкторія похилого струменя з напором до 7 м (а саме такі напори використовуються в більшості фонтанів) близька до параболи [1, 2] (рис. 1, б). Під час розрахунків цих струменів використовують таке рівняння траєкторії:

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{x^2(1 + \varphi H)}{4H \cdot \cos^2 \alpha}, \quad (3)$$

$$l = \frac{2H \cdot \sin 2\alpha}{1 + \varphi H} = \frac{H}{1 + \varphi H} \cdot B. \quad (4)$$

З цього рівняння горизонтальна дальність струменя l за $y = 0$, де $B = 2 \sin 2\alpha$ – горизонтальний параметр траєкторії, який залежить тільки від кута α нахилу насадки.

З формули (4) визначимо теоретичний напір похилого струменя

$$H = \frac{l}{B - \varphi \cdot l}. \quad (5)$$

Найбільшу висоту Z струменя, яка буде за $x = 0,5 \cdot l$, визначають за формулою

$$Z = \frac{H}{(1 + \varphi H)} \frac{\sin 2\alpha}{\cos \alpha} \left(\sin \alpha - \frac{\sin 2\alpha}{4 \cos \alpha} \right) = \frac{H}{1 + \varphi H} \cdot C, \quad (6)$$

де $C = \frac{\sin 2\alpha}{\cos \alpha} \left(\sin \alpha - \frac{\sin 2\alpha}{4 \cos \alpha} \right)$ – вертикальний параметр траєкторії, який залежить тільки від кута α нахилу насадки. За заданої висоти струменя теоретичний напір

$$H = \frac{Z}{C - \varphi Z}. \quad (7)$$

Якщо значення горизонтальної дальності та висоти похилих струменів задані, з формул (5) і (7) можна визначити кут нахилу насадки графічним способом або способом послідовних наближень. Розрахунки горизонтальної дальності та висоти похилих струменів за формулами (4) і (6) за напорів до 7 м збігаються з експериментальними даними [1].

5. Напір на вході у насадку. Напір H_n на вході у насадку визначимо за формулою, подібною до (1)

$$Q_n = \frac{\pi d_n^2}{4} \mu \sqrt{2gH_n} = 3,48 d_n^2 \mu \sqrt{H_n}, \quad (8)$$

де μ – коефіцієнт витрати, який враховує втрати напору у насадці.

З порівняння формул (1) і (8) знайдемо

$$H_n = \frac{H}{\mu^2}, \quad (9)$$

де μ – коефіцієнт витрати, який враховує втрати напору у насадці. Для насадки у вигляді циліндра за довжини 3...4 діаметра $\mu = 0,82$. Якщо насадкою є коротка труба,

$\mu = \frac{1}{\sqrt{1,5 + \lambda \cdot l_\phi / d_\phi}}$; $\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{\operatorname{Re}} + \frac{\Delta}{d_\phi} \right)^{0,25}$ – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного тертя, за

турбулентного режиму λ має значення від 0,011 до 0,045; $Re = \frac{4Q}{\pi d_n v}$ – безрозмірне число

Рейнольдса; ν – кінематична в'язкість, для води $\nu = 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ за температури 15°C ; Δ – шорсткість труб, приймаємо для поліетиленових труб $\Delta = 0,01 \text{ мм}$, для бувших в експлуатації сталевих труб $\Delta = 0,1 \text{ мм}$; l_n – довжина насадки.

6. Діаметри труб. Діаметри труб від насоса до труби з багатьма насадками вираховують за формулою

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_e}}, \quad (9)$$

де v_e – економічна швидкість. Для сталевих труб її приймають до 2 м/с [4], для поліетиленових труб – до 3 м/с.

Далі вибирають стандартний найближчий більший внутрішній діаметр труби [4, 5]. Для фонтанів доцільно використовувати поліетиленові труби німецької фірми Rehau ПЕ 100 PN 10 (марка поліетилену 100, номінальний тиск 10 бар).

7. Втрати напору в трубах. Поздовжні втрати напору h_l у трубопроводі визначають за спрощеною формулою Дарсі-Вайсбаха [4]

$$h_l = 1000 \cdot i \cdot l, \quad (10)$$

де $1000 \cdot i = 1000 \lambda \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^5}$ – втрата напору в трубах довжиною 1000 м для певної витрати, l – довжина труб, у км.

Для різних параметрів сталевих і чавунних труб і витрат води значення $1000 \cdot i$ і швидкості розраховані і представлені у вигляді таблиць в роботі [4], а також у вигляді графіків і таблиць у каталогах насосних фірм. Можна використати також іншу спрощену формулу Дарсі-Вайсбаха [4, 5]

$$h_l = K \cdot A \cdot l \cdot Q^2, \quad (11)$$

де: $A = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5}$ – питомий опір труби певного діаметра (тобто опір одного метра труби); K – швидкісний коефіцієнт.

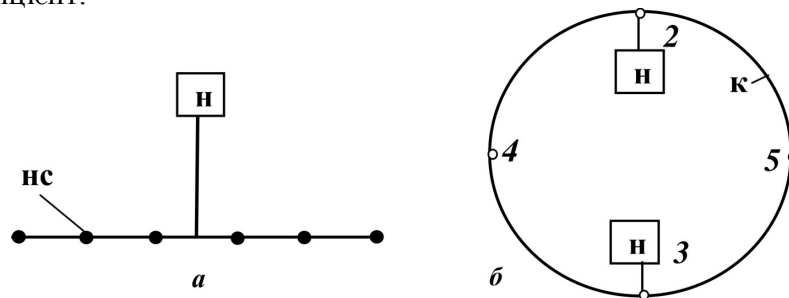


Рис. 2. Схема фонтана з послідовним розташуванням насадок: *а* – вздовж лінії, *б* – вздовж кільця; *н* – насос; *нс* – насадка; *к* – кільце з насадками

Для поліетиленових труб ПЕ 100 PN 10 значення питомих опорів A і швидкісних коефіцієнтів K розраховані і наведені в [5].

У разі послідовного розташування насадок, приклад якого наведено на рис. 2, *б*, вода подається в трубу до ? або ? частини кола, вздовж якого насадки розміщені рівномірно за довжиною, і витрата в трубі змінна також рівномірно. В цьому випадку для визначення втрат напору в частині кола, наприклад 2-4, розрахункову витрату Q_p беруть з формули [6]

$$Q_p = Q_n + 0,55 \cdot (n_n - 1) \cdot Q_n, \quad (11)$$

де: Q_n – витрата через одну насадку; n_n – кількість насадок у частині кола, наприклад, в лінії 2-4.

У початкових точках труб з послідовним розташуванням насадок напір буде більшим, у кінцевих – меншим, через поздовжні втрати напору. Тому висоти струменів будуть різні. Діаметри цих труб підбирають такими, щоб різниця напорів між початковими і кінцевими точками була малою, тобто такою, щоб різниця висот між крайніми струменями була меншою ніж 2 %. Така мала різниця висот струменів буде практично непомітна.

8. Потрібний напір трубопроводу. Потрібний напір H_n трубопроводу з насадками визначають за формулами гідравліки [6, 7]

$$H_n = Z_n + H_n + 1,1 \sum h_i, \quad (12)$$

де: Z_n – висота встановлення насадки відносно рівня води в басейні; H_n – напір на вході у насадку; 1,1 – коефіцієнт, який враховує наявність місцевих гідравлічних опорів у трубопроводі; $\sum h_i$ – сума втрат напору у всіх послідовно з'єднаних трубах від насоса до насадок.

9. Вибір насоса. Для вибору типорозміру насоса використовують його напірну характеристику [7]. На рис. 3, як приклад, наведено характеристики відцентрових насосів типу HF італійської фірми Pedrollo [8].

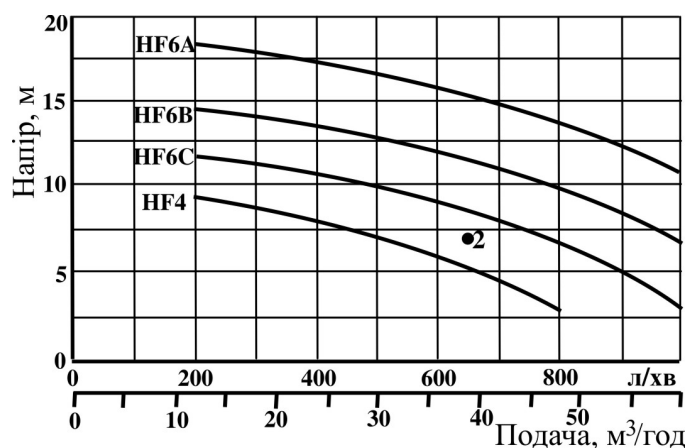


Рис. 3. Характеристики насосів типу HF при 2900 хв^{-1}

Параметри робочої точки трубопроводу з насадками (витрату і потрібний напір) наносять на графік характеристик насосів. Такому трубопроводу відповідає насос, характеристика якого знаходиться вище робочої точки. Наприклад, як вказано на рис. 3, для трубопроводу № 2 з витратою $Q = 39 \text{ м}^3/\text{год}$ і потрібним напором $H_n = 7 \text{ м}$ підходить насос HF6C.

Для зміни висоти струменів регулюють подачу насоса частковим перекриванням вентиля на нагнітальній лінії або зміною частоти обертання вала насоса [7]. Останній метод найбільш економічний і рекомендований до широкого вживання.

На сьогодні одним із поширених способів зміни частоти обертання вала насоса є використання зміни частоти електричного струму. Українські та закордонні виробники випускають багато типорозмірів перетворювачів частоти електричного струму, які мають високі коефіцієнти корисної дії. З перетворювачами частоти електричного струму використовують насоси з трифазними двигунами, наприклад, насоси типу HF. Випускають також насоси з вмонтованими перетворювачами частоти.

Використання вказаних перетворювачів дає змогу змінювати висоту струменя відповідно до наперед заданої програми і навіть у такт музиці. Такі рухи струменів дуже прикрашають фонтан і створюють привабливі умови для відпочинку людей.

Висновок. Запропонований алгоритм гідравлічного розрахунку значно скорочує час проектування фонтанів. Запропонована методика дає змогу отримати фонтанні струмені потрібної форми із найменшими капітальними та експлуатаційними затратами.

Список літератури:

1. Качалов А.А. Противопожарное водоснабжение / А.А. Качалов, Ю.Л. Воротынцева, А.В. Власов. – М. : Изд-во "Стройиздат", 1985. – 286 с.
2. Ольшанский В.П. Приближенные методы расчета гидравлических пожарных струй / В.П. Ольшанский, В.Н. Хальпа, О.А. Дубовик. – Харьков : Изд-во "Митець", 2004. – 116 с.
3. Спышнов А.С. Проектирование водопроводов / А.С. Спышнов. – М. : Изд-во "Стройиздат", 1951. – 348 с.

4. **Шевелев Ф.А.** Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф.А. Шевелев. – М. : Изд-во "Стройиздат", 1973. – 113 с.

5. **Мандрус В.** Втрата напору в пластикових трубах / В. Мандрус, З. Лаврівський // Ринок інсталяцій. – 2008. – № 1. – С. 16-17.

6. **Константінов Ю.М.** Технічна механіка рідини і газу / Ю.М. Константінов, О.О. Гижа. – К. : Вид-во "Вища шк.", 2002. – 277 с.

7. **Мандрус В.І.** Гідравлічні та аеродинамічні машини / В.І. Мандрус. – Львів : Вид-во "Магнолія плюс", 2005. – 340 с.

8. **Каталог** фірми Pedrollo, 2006. – 164 с.

**В.И. Мандрус, канд. техн. наук, доцент (Академия сухопутных войск им. П. Сагайдачного),
А.Я. Регуш (Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности)**

АЛГОРИТМ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ФОНТАНОВ

Предложен алгоритм гидравлического расчета фонтанов. Проанализированы и систематизированы формулы для определения напора на насадках, а также геометрических размеров наклонных фонтанных струй. Эта информация используется для выбора типоразмеров насосов при проектировании фонтанов. Установлено, что на сегодня украинские и заграничные производители выпускают много типоразмеров преобразователей частоты электрического тока, имеющие высокие коэффициенты полезного действия. С преобразователями частоты электрического тока используют насосы с трехфазными двигателями, а также насосы с вмонтированными преобразователями частоты.

Ключевые слова: фонтан, гидравлический расчет, струя, напор, выбор насоса.

**V.I. Mandrus, Assoc. prof. (Academy of Ground Forces the Name of P. Sagaydachnogo),
A.Ya. Regush – Lviv State University of Vital Activity Safety**

ALGORITHM OF HYDRAULIC CALCULATION OF FOUNTAINS

The algorithm of hydraulic calculation of fountains is offered. Formulas are analysed and systematized for determination of pressure on attachments, and also geometrical sizes of sloping of fountain streamed. This information is utilized, to choose typical size pumps during planning of fountains. It is set that for today the Ukrainian and oversea producers produce much typical size transformers frequencies of electric current, which have high output-input ratios. With transformers frequencies of electric current utilize pumps with three-phase engines, and also pumps with the mounted transformers of frequency

Keywords: fountain, hydraulic calculation, stream, pressure, choice to the pump.