

## ГІДРОТЕХНІКА

УДК 621.532

Герасимов Г. Г., к.т.н., доцент, Герасимов Є. Г., к.т.н., доцент,  
Галкина Д. А., студент (Національний університет водного  
господарства та природокористування, м. Рівне)

### ОПТИМАЛЬНИЙ ДІАМЕТР НАПІРНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Розглянуті умови визначення середньо-кубічної витрати трубопроводу ГЕС з урахуванням схеми з'єднання турбін і трубопроводів. Шляхом техніко-економічного аналізу знайдені як загальна формула, так і часткові спрощені формули для різних типів сталевих труб.

**Ключові слова:** трубопровід, гідроелектростанція, діаметр, техніко-економічний аналіз.

Для визначення оптимального діаметра напірного трубопроводу ГЕС необхідно знати середньо-кубічну витрату трубопроводу  $Q_{ср.к}$  [1]. Ця витрата визначається кількістю енергії, яка втрачається в напірному трубопроводі і схемою з'єднання трубопроводів з гідротурбінами.

Згідно [1, С. 173] середньокубічна витрати відповідає залежності

$$Q_{ср.к} = \sqrt[3]{\frac{1}{T_0} \int_0^T Q^3 dt} . \quad (1)$$

де  $T_0$  – число годин роботи турбіни;  $Q$  – витрата турбіни в момент часу  $t$ . Для спрощення залежності (1) приймаємо, що всі напірні трубопроводи одного діаметра і довжини, турбіни однотипні, а ординати ступінчастого графіка навантаження відрізняються на значення, які наближено кратні витраті однієї турбіни  $Q_T$ , причому

$$Q_T = Q_{max} / Z_T, \quad (2)$$

де  $Q_{max}$  – максимальна витрата ГЕС,  $Z_T$  – число турбін.

При таких припущеннях формула (1) набуває такого вигляду [3]

$$q_{рТ} = Q_T , \quad (3)$$

де  $n$  – кількість напірних трубопроводів,  $k$  – кількість ступенів навантаження,  $t_i$  – тривалість  $i$ -го ступеня навантаження,  $\beta_i$  – коефіцієнт, який залежить від схеми з'єднання турбін з трубопроводами, кількості турбін, які працюють в  $i$ -тому періоді (ступені навантаження), і приймаються відповідно таблиці 1.

Економічну ефективність при реалізації проектів гідроелектро-станцій в умовах ринкової економіки визначають з урахуванням фінансових потоків на основі комплексу показників, які встановлюють залежно від стадії проекту та мети оцінки [2, С. 70; 4, С. 90; 5, С. 9]. Основним серед них є чистий дисконтований дохід ( $Ч\partial\partial$ ), який обчислюють за формулою

Таблиця 1

Значення коефіцієнта  $\beta_i$  для визначення середньо-кубічної витрати трубопроводу за формулою (6)

Схема з'єднання насосів і трубопроводів	Значення коефіцієнтів $\beta_i$ при покритті кожного ступеня графіка водоспоживання вказаної кількістю насосів								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	2							
	1	2	3						
	1	8							
	1	2	9	16					
	1	2	3	10	17	24			
	1	8	27						
	1	2	9	16	35	54			
	0,25	2	5,75						
	0,25	0,5	2,25	4	8,75	13,5			
	0,25	2	6,75	16	31,25				
	0,25	2	6,75	16	31,25	54	85,75		
	1	2	3	4	11	18	25	32	
	1	2	3	10	17	24	53	62	81

$$Ч\partial\partial = \sum_{t=0}^T \frac{P_t}{(1+d)^t} \quad (7)$$

де  $t$  – роки реалізації проекту ( $t = 0 \dots T$ );  $d$  – норма прибутку або коефіцієнт (норма) дисконтування;  $P_t$  – чистий грошовий потік у  $t$ -ому періоді (році), який є різницею між сумою притоків (надходжень)  $\Pi_t$  і відтоків (затрат)  $B_t$ , що включають необхідні для реалізації проекту капітальні і поточні затрати. Нульове значення чистого дисконтованого доходу показує, що надходжень від інноваційного проекту достатньо, щоб відновити вкладений капітал (кошти) і забезпечити мінімально необхідний рівень дохідності від його вкладання. Якщо чиста нинішня вартість проекту позитивна, то він прийнятний для реалізації. Чим вища величина  $\text{ЧДД}$ , тим кращим є технічне рішення даного проекту.

У техніко-економічних розрахунків системи виробництва електроенергії необхідно розглядати як єдиний технологічний комплекс: турбінні агрегати – напірні водоводи. Це зв'язано з необхідністю враховувати змінну складову експлуатаційних витрат – вартість електроенергії на заміщення втрачаємого виробітку електроенергії внаслідок гідравлічних втрат в напірних водоводах. Тому в техніко-економічних розрахунках гідроенергетичних установок капітальні і поточні затрати повинні включати: будівельну вартість (капітальні затрати)  $K_t$  та експлуатаційні витрати: амортизаційні відрахування  $Ba_t$ , вартість втраченої електроенергії  $Bel_t$ , витрати на заробітну плату  $Bzn_t$  та інші відрахування  $Bin_t$ .

$$P_t = \Pi_t - B_t = \Pi_t - K_t - Ba_t - Bel_t - Bzn_t - Bin_t, \quad (8)$$

Тоді

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{\Pi_t - K_t - Ba_t - Bel_t - Bzn_t - Bin_t}{(1+d)^t} = \Pi_n - B_n, \quad (9)$$

де  $\Pi_n$  і  $B_n$  – дисконтовані величини прибутку і сумарних витрат на початок реалізації проекту, тобто при  $t = 0$ .

Величина дисконтованого прибутку визначається за формулою

$$\Pi_n = \sum_{t=0}^T \frac{\Pi_t}{(1+d)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{W_{pt} C_{mt}}{(1+d)^t}, \quad (10)$$

де  $W_{pt}$  – реалізація кількості електроенергії за  $t$ -ий рік, кВт·год;  $a_{el}$  – тариф на електроенергію в  $t$ -ому році, грн/кВт·год.

Дисконтовані сумарні затрати

$$B_n = \sum_{t=0}^T \frac{K_t + Ba_t + Bel_t + Bzn_t + Bin_t}{(1+d)^t}. \quad (11)$$

Величина  $\text{ЧДД}$  згідно формули (9) буде найбільшою при мінімумі  $B_n$ . При цьому значення прибутків  $\Pi_n$  за формулою (10) повинні бути однаковими при різних величинах діаметрів напірних трубопроводів

насосної станції. Це означає, що економічно вигідні (оптимальні) діаметри труб водоводів будуть відповідати мінімуму функцій мети  $B_H$  для пошукового аргументу  $D_{ек}$  за умови врахування тільки тих затрат, які залежать від діаметру труб, а саме

$$B_H = \sum_{t=0}^{T_k} \frac{K_t}{(1+d)^t} + \sum_{t=0}^{T_k} \frac{Bat + Bel_t}{(1+d)^t} = \min, \quad (12)$$

де  $T_k$  – період надходження капіталовкладень.

Якщо капіталовкладення здійснюються тільки на протязі першого року інвестиційного проекту ( $t=0$ ), то формула (12) набуває такого вигляду

$$B_H = K_t + \sum_{t=0}^T \frac{Bat + Bel_t}{(1+d)^t} = \min, \quad (13)$$

що відповідає рекомендаціям [6].

При виконанні розрахунків на 1 км трубопроводу капіталовкладення будуть відповідати вартості укладання 1 км труби  $K$ , а втрати напору  $h_w = Aq_{pm}^2$ . Приймаємо наступний вигляд апроксимуючих залежностей для  $K$  і  $A$  від діаметру трубопроводу  $D$ .

$$K = C_D D^\alpha, \quad (14)$$

$$A = B / D^\varepsilon = B D^{-\varepsilon}. \quad (15)$$

Параметри цих залежностей отримані в результаті апроксимації даних відповідних сайтів і таблиць [7] і представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри залежностей (14) і (15)

Параметри залежності для визначення вартості труб				Параметри коефіцієнта втрат напору $A$ , $c^2/m^5$		
Тип труб	$C_D$ , грн/км	$\alpha$	Джерело – прайси сайтів:	$B$	$\varepsilon$	Джерело- таблиці [3]
		-		-	-	
Сталеві: при товщині стінок $\delta=10$ мм $\delta=20$ мм $\delta=30$ мм $\delta=40$ мм	3185 6370 9555 12740	1 1 1 1	<a href="http://kiev.zakupka.com">http:// kiev. zakupka/c om</a>	0,001735	5,3	С. 6, ф-ла (8)
з/бетонні: II гр., $p=15$ ат III гр., $p=10$ ат	1636 1480	1,53 1,46	<a href="http://www.ukfr.eewell.com.ua">www.ukfr eewell/ com.ua</a>	0,001732	5,19	С.17, ф-ла (25)
а/цементні: ВТ-6, $p=6$ ат ВТ-9, $p=9$ ат	3294,5 4447,1	1,67 1,76	<a href="http://www.ukfr.eewell.com.ua">www.ukfr eewell/ com.ua</a>	0,001212	5,19	С. 14, ф-ла (19)

Поліетиленові ПЕ-80, ρ=0,40 МПа ρ=0,63 МПа ПЕ-100, ρ=0,63 МПа ρ=1,00 МПа ρ=1,60 МПа	3294,4 5219,0 4447 5219 8594	2,0 1,945 2,07 1,945 1,98	<a href="http://www.polyplastic.ua">www.polyplastic.ua</a>	0,00111	5,23	С. 19, ф-ла (30)
Чавунні	5219	1,945	<a href="http://ds.kb.ub.ua">http://ds.kb.ub.ua</a>	0,001735	5,3	С. 6, ф-ла (8)

Вважаючи щорічні затрати ( $Ba_t + Vel_t$ ) постійними, для спрощення виразу (13) вводимо позначення і знаходимо суму членів цього виразу як суму геометричної прогресії [8, С. 160]:

$$S_n = \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+d)^t} = \frac{1 - \left(\frac{1}{1+d}\right)^T}{1 - \frac{1}{1+d}}. \quad (16)$$

З урахуванням прийнятих позначень складові цільової функції набувають такого вигляду:

$$K_t = K = C_D D^\alpha, \quad (17)$$

$$Ba_t = bK = b C_D D^\alpha S_n, \quad (18)$$

$$Vel_t = a_{ел} g B T_p Q^3_{ср.к} \eta_2 S_n D^{-\epsilon}, \quad (19)$$

де  $b$  – доля капіталовкладень для відрахування на амортизацію,  $\eta$  – коефіцієнт корисної (ККД) гідроагрегата;  $\eta_2$  – Коефіцієнт корисної дії гідрогенератора;  $T_p$  – тривалість роботи насосної гідроелектростанції на протязі року, годин;  $a_{ел}$  – тариф на електроенергію, грн/(кВт·год). Національна комісія, яка здійснює державне регулювання в сфері енергетики України (НКРЕ) збільшила тарифи на електроенергію з березня 2013 року до  $a_{ел} = 0,9924$  грн/(кВт·год); <http://finmonitor.com.ua/>

При зазначених припущеннях цільова функція згідно формули (13) набуває наступного вигляду

$$B_n = C_D D^\alpha + b C_D S_n D^\alpha + a_{ел} g B T_p Q^3_{ср.к} \eta_2 S_n D^{-\epsilon}, \quad (20)$$

або

$$B_n = (1 + b S_n) C_D D^\alpha + a_{ел} g B T_p Q^3_{ср.к} \eta_2 S_n D^{-\epsilon}. \quad (21)$$

Якщо капіталовкладення в будівництво напірних трубопроводів здійснюється не за один рік, а на протязі  $T_k$  років, то припускаючи, що воно здійснюється рівними долями  $K/T_k$ , отримаємо:

$$B_H = C_D D^\alpha S_K / T_K + b C_D S_n D^\alpha + a_{ел} g B T Q^3_{cp.k} \eta \eta_z S_n D^{-\varepsilon}, \quad (22)$$

де  $S_K$  – коефіцієнт, який враховує дисконтування капіталовкладень і визначається за формулою

$$S_K = \sum_{t=0}^{T_K} \frac{1}{(1+d)^t} = \frac{1 - \left(\frac{1}{1+d}\right)^{T_K}}{1 - \frac{1}{1+d}}. \quad (23)$$

Тоді отримаємо більш узагальнений вираз для цільової функції:

$$B_H = (S_K / T_K + b S_n) C_D D^\alpha + a_{ел} g B T_p Q^3_{cp.k} \eta \eta_z S_n D^{-\varepsilon}. \quad (24)$$

Визначимо мінімум цільової функції (екстремум), який відповідає оптимальному діаметру трубопроводу (економічно-найвигіднішому)  $D_{ен}$ . Для цього візьмемо похідну від цільової функції, прирівняємо її нулю і вирішимо отримане рівняння відносно діаметра трубопроводу  $D$ , м.

$$\frac{dB_H}{dD} = (S_K / T_K + b S_n) C_D \cdot \alpha D^{\alpha-1} + a_{ел} g B T_p Q^3_{cp.k} \eta \eta_z \cdot S_n (-\varepsilon) D^{-\varepsilon-1} = 0. \quad (25)$$

Звідси загальна формула для визначення оптимального діаметра напірного трубопроводу ГЕС:

$$D_{ен} = [(a_{ел} g B T_p Q^3_{cp.k} \eta \eta_z \cdot S_n \varepsilon) / ((S_K / T_K + b S_n) C_D \cdot \alpha)]^{1/(\varepsilon + \alpha)}. \quad (26)$$

Якщо в цю загальну формулу підставити дані з таблиці 2 і  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ , то отримаємо спрощені формули для кожного типу труб:

– Сталеві труби

$$D_{ен} = [(0,0902 a_{ел} T_p Q^3_{cp.k} \eta \eta_z \cdot S_n) / ((S_K / T_K + b S_n) 318,5 \delta)]^{0,159}, \quad (27)$$

де  $\delta$  – товщина стінки сталевих стандартного трубопроводу, мм.

Для сталевих труб більш складного конструктивного виконання формула набуває вигляду

$$D_{ен} = [(0,0902 a_{ел} T Q^3_{cp.k} \eta \eta_z \cdot S_n) / ((S_K / T_K + b S_n) 318,5 K_{mp})]^{0,159}, \quad (28)$$

де  $K_{mp}$  – коефіцієнт, який враховує зростання вартості трубопроводу при більш складних конструкціях трубопроводу. В першому наближенні можна приймати для сталевих трубопроводів індивідуального виконання  $K_{mp} = 2$ ; для сталевих трубопроводів з бандажними кільцями  $K_{mp} = 3$ ; для сталевих трубопроводів з катковими опорами  $K_{mp} = 4$  [9].

Приклад розрахунку оптимального діаметра турбінного трубопроводу при наступних вихідних даних:

Встановлена потужність ГЕС..... $N_{уст} = 31000 \text{ кВт}$ ;

Кількість гідротурбін ГЕС..... $Z_T = 3 \text{ шт}$ ;

Кількість напірних водоводів..... $Z_B = 1 \text{ шт}$ ;

Потужність одного гідроагрегату..... $N_T = 1033 \text{ кВт}$ ;

Кількість умовних годин роботи з встановленою потужністю за добу..... $T_d = 10$  годин;

Кількість умовних годин роботи ГЕС за рік... $T = 3650$  годин;

Максимальна витрата..... $Q_{max} = 80$  м<sup>3</sup>/с;

Максимальна витрата одного гідроагрегату  $Q_{max p} = 26,67$  м<sup>3</sup>/с;

Вартість електроенергії..... $a_{ел} = 0,9924$  грн/кВт·год;

Довжина одиночного турбінного водоводу дорівнює  $L = 114$  м;

Далі він ділиться на три водоводи довжиною..... $L_e = 55$  м;

Схема підводу води до будівлі ГЕС: один магістральний напірний водовід на три гідроагрегати.

Тип і матеріал водоводів: металеві (сталеві), з коефіцієнтом шорсткості  $n = 0,011$ ; з вартістю погонного метра сталевих трубопроводу (грн/пм) згідно залежності  $K = 318,5\delta D$ , де  $\delta$  – товщина стінки трубопроводу, мм;  $D$  – діаметр трубопроводу, м.

Коефіцієнт корисної дії гідротурбіни..... $\eta = 0,8$ ;

Коефіцієнт корисної дії гідрогенератора..... $\eta_r = 0,98$ ;

Коефіцієнт амортизації..... $b = 0,02$ ;

Норма дисконтування..... $d = 0,1$ ;

Період реалізації проекту  $T = 20$  років.

Вважаємо, що капіталовкладення в напірні трубопроводи проводяться на протязі трьох років рівними долями, тобто  $T_k = 3$  роки.

*Розв'язання:* Знаходимо коефіцієнти, які визначають дисконтування капіталовкладень, за формулами (16) і (23)

$$S_n = \frac{1 - \left(\frac{1}{1+d}\right)^T}{1 - \frac{1}{1+d}} = \frac{1 - \left(\frac{1}{1+0,1}\right)^{20}}{1 - \frac{1}{1+0,1}} = 9,34;$$

$$S_k = \frac{1 - \left(\frac{1}{1+d}\right)^{T_k}}{1 - \frac{1}{1+d}} = \frac{1 - \left(\frac{1}{1+0,1}\right)^3}{1 - \frac{1}{1+0,1}} = 2,73.$$

Для сталевих стандартного трубопроводу знаходимо оптимальний діаметр за формулою (27) при постійній витраті ГЕС, тобто приймаючи в першому наближенні  $Q_{cp.k} = Q_{max}$ :

$$D_{ен} = [(0,0902 a_{ел} T_p Q_{cp.k}^3 \eta \eta_r S_n) / ((S_k / T_k + b S_n) 318,5 \delta)]^{0,159} =$$

$$= \left[ \frac{0,0902 \cdot 0,9924 \cdot 3650 \cdot 80^3 \cdot 0,8 \cdot 0,98 \cdot 9,34}{(2,73 / 3 + 0,02 \cdot 9,34) \cdot 318,5 \cdot 10} \right]^{0,159} = 7,61 \text{ м.}$$

Враховуючи консервативність цільової функції в зоні оптимального значення діаметра трубопроводу (принцип Ле Шательє), при-

ймаємо в цьому варіанті  $D_{ен} = 7$  м, тобто зменшуємо діаметр і відповідні капіталовкладення і при цьому практично не змінюючи значення цільової функції [1].

Якщо враховувати нерівномірність добового навантаження ГЕС, наприклад, приймаючи його ступінчастим відповідно з графіком рисунка, то середньокубічну витрату ГЕС можна знайти за формулою (3).

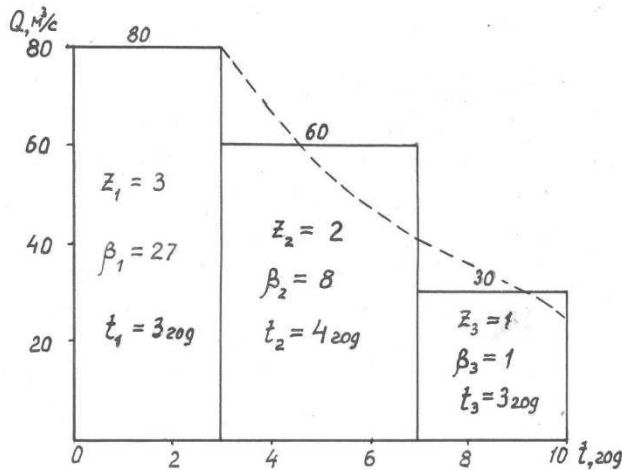


Рисунок. Добовий графік тривалості витрати води напірним трубопроводом

$$Q_{ср.к} = Q_T \sqrt[3]{\left(\sum_{i=1}^k \beta_i t_i\right) / n T_0} = 26,67 \sqrt[3]{\frac{27 \cdot 3 + 8 \cdot 4 + 1 \cdot 3}{1 \cdot 10}} = 60,37 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Знайдемо оптимальний діаметр трубопроводу при середньокубічній витраті трубопроводу  $Q_{ср.к} = 60,37 \text{ м}^3/\text{с}$  за формулою (27)

$$D_{ен} = \left[ \frac{0,0902 \cdot 0,9924 \cdot 3650 \cdot 60,37^3 \cdot 0,8 \cdot 0,98 \cdot 9,34}{(2,73/3 + 0,02 \cdot 9,34) \cdot 318,5 \cdot 10} \right]^{0,159} = 6,65 \text{ м}.$$

Приймаємо в цьому випадку стандартне значення діаметру трубопроводу  $D_{ен} = 6$  м.

Таким чином, вплив значення середньокубічної витрати  $Q_{ср.к}$  на оптимальний діаметр досить відчутний, тому нерівномірність графіка навантаження ГЕС доцільно враховувати.

Використання загальної формули (26) і даних таблиці 2 дозволяють визначити оптимальні діаметри напірних водоводів ГЕС для труб з різних матеріалів, особливо це стосується напірних трубопроводів малих гідроелектростанцій.

1. Гидроэнергетические установки / Д. С. Щавелев, Ю. С. Васильев, Н. И. Головачевский и др., под ред. Д. С. Щавелева. – Л. : Энергия, 1972. – 392 с.
2. Ткачук О. А. Удосконалення систем подачі та розподілення води населених пунктів. Монографія / О. А. Ткачук. – Рівне : НУВГП, 2008. – 301 с.
3. Герасімов Є. Г. Оптимальний діаметр напірних трубопроводів насосних станцій / Герасімов Є. Г. // Вісник НУВГП. Технічні науки. Вип. 4 (64). – Рів-



не, 2013. – С. 12–23. **4.** Лукашин Ю. П. Финансовая математика. – М. : Изд. Центр ЕАОИ, 2008. – 200 с. **5.** Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво. – Київ, 2001. – 32 с. **6.** Буркова Ю. Г. Оптимизация технико-экономических параметров крупных насосных станций с учетом их надежности. – Автореферат диссертации к.т.н. – М. : 2000. – 24 с. **7.** Шевелев Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справ. Пособие / Шевелев Ф. А., Шевелев А. Ф. – М. : Стройиздат, 1984. – 116 с. **8.** Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. – М. : Гос. из-во физ.-мат. лит.-ры, 1962. – 608 с. **9.** Герасимов Г. Г. Проектування автоматизованих насосних станцій підкачки. Навчальний посібник / Герасимов Г. Г. – Рівне : НУВГП, 2007. – 552 с.

Рецензент: д.т.н., професор Ткачук М. М. (НУВГП)

---

**Herasymov H. H., Candidate of Engineering, Associate Professor,**  
**Herasimov Y. H., Candidate of Engineering, Associate Professor,**  
**Halkyna D. A., Senior Student** (National University of Water and  
Environmental Engineering, Rivne)

#### **OPTIMAL DIAMETER OF HYDROPOWER PRESSURE PIPES**

**Determined the conditions of the medium-cubic pipeline flow hydroelectric power station depending of schemes of compounds turbines and pipelines. By using the technical and economic analysis was found a general formula, and partial simplified formulas for different types of steel pipes.**

***Keywords:* pipeline, hydroelectric power station, diameter, technical and economic analysis.**

---

**Герасимов Г. Г., к.т.н., доцент, Герасимов Е. Г., к.т.н., доцент,**  
**Галкина Д. А., студент** (Национальный университет водного  
хозяйства и природопользования, г. Ровно)

#### **ОПТИМАЛЬНЫЙ ДИАМЕТР НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

**Рассмотрены условия определения средне-кубического расхода трубопровода ГЭС с учетом схемы соединения турбин и трубопроводов. Путем технико-экономического анализа найдены как общая формула, так и частные упрощенные формулы для различных типов стальных труб.**

***Ключевые слова:* трубопровод, гидроэлектростанция, диаметр, технико-экономический анализ.**

---