

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, β_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 β_i для визначення середньо-кубічної витрати трубопроводу за формулою (6)

Схема з'єднання насосів і трубопроводів	Значення коефіцієнтів β_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) Π_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 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 Vel_t , витрати на заробітну плату Bzn_t та інші відрахування Bin_t .

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

Тоді

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

де Π_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

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

Величина ЧДД згідно формули (9) буде найбільшою при мінімумі B_n . При цьому значення прибутків Π_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 пм трубопроводу капіталовкладення будуть відповідати вартості укладання 1 пм 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/пм	α	Джерело – прайси сайтів:	B	ε	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	http:// kiev. zakupka/c om	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	www.ukfr eewell/ com.ua	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	www.ukfr eewell/ com.ua	0,001212	5,19	С. 14, ф-ла (19)

Поліетиленові ПЕ-80, $\rho=0,40$ МПа $\rho=0,63$ МПа ПЕ-100, $\rho=0,63$ МПа $\rho=1,00$ МПа $\rho=1,60$ МПа	3294,4 5219,0 4447 5219 8594	2,0 1,945 2,07 1,945 1,98	www.polyplastic.ua	0,00111	5,23	С. 19, ф-ла (30)
Чавунні	5219	1,945	http://ds.kb.ub.ua	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, η – коефіцієнт корисної (ККД) гідроагрегата; η_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 отримуємо 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 отримуємо 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 δ – 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..... $Q_{max} = 80$ м³/с;

Максимальна витрата одного гідроагрегату $Q_{max p} = 26,67$ м³/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 δ – 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).

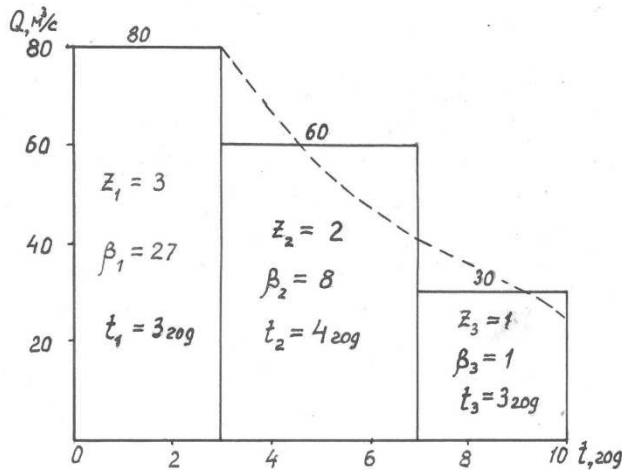


Рисунок. Добовий графік тривалості витрати води напірним трубопроводом

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

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.**
