

Яковлева-Гаврилюк О. М., к.т.н. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ЗАСТОСУВАННЯ АНАЛІТИЧНИХ МЕТОДІВ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ОПТИМАЛЬНИХ ДІАМЕТРІВ НАПІРНИХ ТУНЕЛІВ ГЕС

Розглянуто аналітичні методи різних авторів для визначення оптимальних діаметрів напірних тунелів ГЕС, що розроблені на основі методу визначення порівняльної економічної ефективності. Проведено аналіз умов їх застосування для сучасних проектів ГЕС.

Ключові слова: тунель, гідроелектростанція, діаметр, оптимізація, приведені затрати.

Тунелі ГЕС, як і інші водопідвідні споруди гідроенергетичних установок (ГЕСУ), є спеціальними гідротехнічними спорудами, режими роботи яких впливають на установлену потужність і виробіток електроенергії ГЕС. Їх розміри, а, конкретно, площа поперечного перерізу ω , повинні визначатися за принципом максимального енергозабезпечення при мінімальних сумарних затратах на будівництво водоводу Z_{Σ} , тобто бути оптимальними

$$\omega_{opt} = f(Z_{\Sigma}) \Rightarrow \min. \quad (1)$$

Цей загальний підхід до визначення розмірів енергетичних водоводів покладено в основу їх техніко-економічних розрахунків [1; 2]. Такі розрахунки дозволяють на основі економічних критеріїв прийняти гідравлічні параметри, такі як розрахункова швидкість v_p та втрати напору h_w ,

$$(v_p, h_w) = f(Z_{\Sigma}). \quad (2)$$

В техніко-економічних розрахунках використовують критерії абсолютної (фінансової) та порівняльної економічної ефективності. Перші базуються на мінімізації експлуатаційних витрат (B_n) і максимізації чистого дисконтованого доходу ($ЧДД$) самої ГЕС, як енергетичного підприємства [3]. Такий підхід дозволяє досягнути максимальної енерговіддачі при мінімізації витрат тільки на будівництво і експлуатацію ГЕС. Проте, важливим питанням є те, що ГЕС, приймаючи участь в роботі енергосистеми, витісняють більш дорогі за собівартістю електроенергії теплові електростанції (ТЕС), а також зменшують використання палива для забезпечення потреби в енергії, в ці-



лому, по країні. Тому, використання критеріїв порівняльної економічно ефективності, а саме мінімуму приведених затрат за варіантами, що порівнюються, залишається актуальним і сьогодні.

Приведені затрати в i -ий варіант генерації потужності в енергосистему визначаються за залежністю:

$$Z_i = EK_i + B_i, \quad (3)$$

де Z_i – приведені затрати; K_i – капіталовкладення в енергетичне підприємство; B_i – щорічні експлуатаційні витрати, які включають амортизаційні відрахування; E – норматив ефективності, який рівний нормативу дисконтування і для гідроенергетичних об'єктів рекомендовано приймати $E=0,1$. При цьому усі варіанти, що розглядаються, повинні бути приведені до однакових умов по кількості, якості і умовам отримання однакової продукції.

В свою чергу, сама цільова функція мінімуму сумарних приведених затрат (1) в різний час визначалась різними науковцями з однаковою кількістю складових затрат. Так, Губіним Ф.Ф. [4] і Губіним М.Ф. [5] пропонується двоскладова функція сумарних приведених затрат:

$$Z_{\Sigma} = Z_d + Z_{зам(ТЕС)} \Rightarrow \text{мін}, \quad (4)$$

де Z_d – затрати на деривацію, $Z_{зам(ТЕС)}$ – затрати на замінуючу теплову електростанцію (ТЕС), на якій компенсується втрачена потужність на ГЕУ, що визначається втратами напору у водоводі з розмірами, що варіюються.

В.А. Орловим у роботах [6; 7] було обґрунтовано трьохскладову цільову функцію мінімуму сумарних приведених затрат:

$$Z_{\Sigma} = Z_d + Z_{зам(ТЕС)} + Z_{ПБ} \Rightarrow \text{мін}, \quad (5)$$

де $Z_{ПБ}$ – затрати на паливо по замінуючій тепловій електростанції (її паливну базу).

В роботах Яковлевої О.М. [8] обґрунтовується необхідність врахування ще й затрат по спряженій з водоводом гідроенергетичній установці, розміри (і, відповідно, вартість) якої залежать від втрат напору у водоводі, які приводять до втрат потужності на ГЕУ:

$$Z_{\Sigma} = Z_d + Z_{зам(ТЕС)} + Z_{ПБ} \pm Z_{ГЕУ} \Rightarrow \text{мін}. \quad (6)$$

Як відмічає автор у [8], усі способи пошуку мінімуму цільової функції (1) поділяються на 3 групи методів: 1) варіантний; 2) аналоговий; 3) експериментальний. Найбільш точним є варіантний спосіб, який в свою чергу може реалізовуватись графічними, графоаналітичними, чисельними та аналітичними методами. У свою чергу, найбільш точним і таким, що дає можливість врахувати велику кількість вихідної інформації є, звичайно, чисельний метод реалізації варіант-

ного способу. Проте, він вимагає оцінки кожного конкретного варіанту конструкції енергетичного водоводу, яка на попередніх стадіях проектування в деталях ще не визначена. Тому, на перших стадіях проектування доцільно користуватись аналітичним методом реалізації варіантного способу розрахунку оптимального перерізу, який ґрунтується на положенні, що перша похідна цільової функції за параметром, який оптимізується, в точці оптимуму дорівнює нулю:

$$\omega_{opt} = \frac{dZ_{\Sigma}}{d\omega} = 0. \quad (7)$$

Залежність (7) представляє загальний підхід до виведення аналітичних залежностей для визначення оптимальних перерізів енергетичних водоводів як напірних, так і безнапірних.

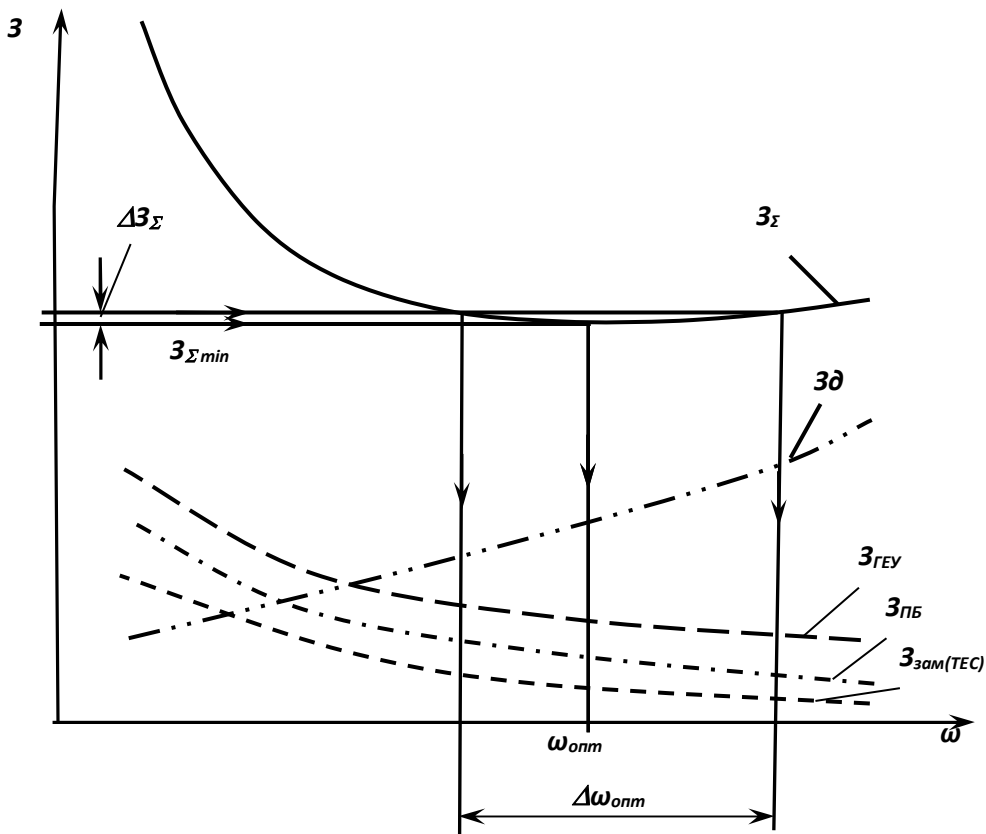


Рисунок. Вибір оптимального перерізу енергетичного водоводу за критерієм мінімуму сумарних приведених дисконтованих затрат: діапазон перевищення мінімальних приведених затрат $\Delta Z_{\Sigma} = 1-2\% Z_{\Sigma min}$ та діапазон можливих значень оптимального перерізу $\Delta \omega_{opt}$

Як видно з рисунку, незначне відхилення від мінімуму сумарних



затрат на $1-2\% \Delta 3_{\Sigma} = 1-2\% 3_{\Sigma \min}$ визначає досить широкий діапазон можливих оптимальних значень діаметру енергетичного водоводу. Причому, менші значення оптимального діаметру не приведуть до суттєвого зменшення енерговіддачі від ГЕУ в енергосистему. Від інших типів напірних енергетичних водоводів, а саме трубопроводів, тунелі ГЕС виокремленні в окрему групу за особливостями виконання будівельних робіт, що приводить до необхідності окремого врахування вартості скельної підземної виїмки ґрунту та вартості улаштування залізобетонної оболонки напірного тунелю, на відміну від напірних наземних металевих трубопроводів ГЕС [8].

Диференціювання двоскладової функції сумарних приведених затрат (4) дозволило Губіну Ф.Ф. [4] отримати залежність для визначення оптимального діаметру напірного тунелю ГЕС у вигляді:

$$D_{opt}^{7,33} = 285 \frac{\sum (Q_i^3 \Delta T_i) n^2 b}{\alpha_{тун} (1,44 a_{гр} + 0,44 a_{обл})}, \quad (8)$$

де D_{opt} – оптимальний діаметр відповідно тунелю; Q_i – витрата, що проходить по водоводу у відповідний проміжок часу ΔT_i ; n – шорсткість стінок водоводу; $\alpha_{тун}$ – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування у тунель; $a_{гр}$, $a_{тун}$ – відповідно питома вартість ґрунтових тунельних виїмок та облицювання; b – вартість 1 кВт·год виробітку електроенергії на замінуючій тепловій електростанції ТЕС.

Масштабне зведення гідротехнічних об'єктів на початку ХХ століття вимагало розробки універсальних аналітичних залежностей для визначення розмірів окремих їх елементів не тільки в колишньому СРСР, але й за кордоном. Так, в 30-х роках ХХ сторіччя німецьким інженером Бундшу [9] була запропонована формула для визначення економічно найвигіднішого діаметра трубопроводів всіх типів незалежно від матеріалу їх виготовлення (металевих, залізобетонних, дерев'яних і т.п.):

$$D = \sqrt[7]{\frac{5,2 Q_{max}^3}{H}}, \quad (9)$$

де Q – максимальна витрата трубопроводу; H – напір, що створюється в трубопроводі. В цій формулі прийнятий множник 5,2 відповідає середнім, для Германії на той час, вартостям трубопроводу і енергії.

В подальшому ряд вчених плідно розробляли положення енергоекономічних розрахунків параметрів енергетичних водоводів гідротехнічних об'єктів на основі емпіричних залежностей. Одна з таких, рекомендована Д.С. Щавелєвим, в [5] має вигляд:

$$D = 0,709 \frac{N_m^{0,43}}{H^{0,65}}, \quad (10)$$

де N_r – потужність турбіни, кВт; H – напір нетто, м.

Також на основі двоскладової функції сумарних приведених затрат (4), але з більшою кількістю впливових вихідних параметрів, Губіним М.Ф. в [5] було запропоновано залежність для визначення оптимального діаметру тунелю ГАЕС, що без врахування компенсації енергії на заряд ГАЕС, можна використати для визначення поперечного перерізу тунелю ГЕС:

$$D_{ек}^{7,33} = 343n^2 \frac{\left[(Q^3 T) \eta_m \eta_g b_{зам} \right]}{\frac{\alpha_{тун}}{m^2} \left[(m+2)^2 a_{ск} + 4(m+1)a_{бет} \right] + \frac{2\alpha_{см} H \gamma_{см} a_{см} f}{[\sigma] k_{шва}}}, \quad (11)$$

де H – повний динамічний напір, м; $a_{см}$ – вартість металевого облицювання, у.о./т; $a_{бет}$ – вартість бетонного облицювання, у.о./м³; $a_{ск}$ – вартість скельної виїмки, у.о./ м³; m – співвідношення внутрішнього діаметру тунелю до товщини бетонного облицювання; n – коефіцієнт шорсткості стінок водоводу; Q – витрата, м³/с; T – кількість годин використання установленної потужності ГЕС протягом року, год; f – коефіцієнт, який враховує місцеві втрати напорі (повороти, спряження з іншими спорудами та ін.) в долях від втрат по довжині; σ – допустиме напруження оболонки тунелю, т/м²; $\gamma_{ст}$ – питома вага відповідно металу, т/м³; $k_{шва}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову вагу водоводу за рахунок елементів жорсткості і фасонних частин оболонки тунелю; $b_{зам}$ – вартість 1 кВт-год виробленої електроенергії на замінуючій тепловій електростанції ТЕС.

В.А. Орловим в [6; 7] були обґрунтовані залежності для економічно найвигідніших діаметрів сталевих водоводів і дериваційних тунелів ГЕС і ГАЕС. Аналітичний метод визначення оптимального діаметру тунелю ГЕС Орлова має вигляд:

$$d^{22/3} = 391 n^2 \eta_m \eta_g k m^2 \times \frac{\left[Q_{макс}^3 \left(\epsilon_n K_N^{TEC} + I_N^{TEC} \right) + 7,95 Q_{ср.эн}^3 \left(\epsilon_n q K_{т.б.}^{yд} + 10^3 I_{т.б.}^{yд} \right) \right]}{\left(m^2 + 2 \right)^2 \left(\epsilon_n + \alpha \right) a}, \quad (12)$$

де $Q_{макс}$ – максимальна витрата у водоводі, м³/с; η_t, η_r – коефіцієнт корисної дії відповідно турбіни і генератора; n – коефіцієнт шорсткості водоводу; k – коефіцієнт, який враховує місцеві втрати напорі (пово-



роти, спряження з іншими спорудами та ін.) в долях від втрат по довжині; a – кошторисна вартість 1 м^3 готового тунелю по зовнішньому абрису, включаючи всі види будівельних робіт, у.о./ м^3 ; m – відношення внутрішнього діаметра тунелю до товщини облицювання тунелю; ε_n – нормативний коефіцієнт ефективності; α – перехідний коефіцієнт від капіталовкладень в споруди енергетичного водоводу до щорічних витрат; K_N^{TEC} , I_N^{TEC} – відповідно питомі капіталовкладення і питомі щорічні витрати на 1 кВт установленної потужності ТЕС, у.о./кВт; $K_{\text{т.б.}}^{\text{у.а.}}$ – питомі капіталовкладення в паливну базу віднесені до 1 т умовного палива, у.о./т; $I_{\text{т.б.}}^{\text{у.а.}}$ – питомі щорічні витрати по паливній базі, коп/кВт·год; $Q_{\text{ср.ен}}$ – середньо енергетична витрата ГЕС, $\text{м}^3/\text{с}$; q – питома витрата палива при заміщенні втрат енергії на ТЕС, кг/кВт·год.

Врахування втрат напору у водоводі здійснено В.А. Орловим за максимальною витратою $Q_{\text{макс}}$, а втраченої потужності через $Q_{\text{макс}}^3$, при яких визначаються характеристики теплової електростанції (ТЕС). Щорічна втрата енергії у водоводі враховувалась через серед-

ньо енергетичну витрату $Q_{\text{ср.ен}}^3 = \frac{\sum_{i=1}^T Q_i^3 \Delta t_i}{8760}$, при якій визначаються

вартісні характеристики паливної бази. Як показують параметри, які входять до формул, Орловим була здійснена спроба якомога повніше врахувати будівельні характеристики траси водоводу і режим роботи ГЕС в енергосистемі.

Автором в роботі [10] пропонується аналітичний метод визначення оптимального діаметру напірного тунелю ГЕС, виведений шляхом диференціювання чотирьохскладової функції сумарних приведених затрат (6):

$$D_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\left\{ 342,9 \frac{Q_{\text{ср.к.}}^3 \cdot n^2 \cdot \eta_a (C_{\text{відн}}^{\text{ПБ}} + C_{\text{відн}}^{\text{ТЕС}} - C_{\text{відн}}^{\text{ГЕС}})}{\alpha_{\delta} \frac{\pi}{4} [a_{\text{зр}} (1 + 2\bar{\delta})^2 + 4a_{\text{от}} \bar{\delta} (1 + \bar{\delta})]} \right\}^{22}} . \quad (13)$$

$$\text{У формулі (13)} \quad C_{\text{відн}}^{\text{ПБ}} = T b_{\text{з.нал}} \cdot q E_E^{\text{ТЕС}} ; \quad (14)$$

$$C_{\text{відн}}^{\text{ТЕС}} = \alpha_{\text{ТЕС}} K_N^{\text{ТЕС}} E_N^{\text{ТЕС}} K_{\text{ек}} ; \quad (15)$$

$$C_{\text{відн}}^{\text{ГЕС}} = \alpha_{\text{ГЕС}} K_N^{\text{ГЕС}} . \quad (16)$$

У (13)-(16) $Q_{\text{ср.к.}}$ – середньо кубічна витрата, $\text{м}^3/\text{с}$; α_{δ} – частка постійних відрахувань на щорічні експлуатаційні витрати від капіталовкладень в тунель; $\alpha_{\text{ТЕС}}$ – частка постійних відрахувань на щорі-

чні експлуатаційні витрати від капіталовкладень на ТЕС; $\alpha_{ГЕС}$ – частка постійних відрахувань на щорічні експлуатаційні витрати від капіталовкладень на ГЕС; g – прискорення вільного падіння, м/с²; T – кількість годин використання установленної потужності ГЕС протягом року, год; η_a – коефіцієнт корисної дії агрегату ГЕС; $a_{зр}$ – питома вартість скельної виїмки, у.о./м³; a_{OT} – питома вартість оболонки тунелю, у.о./м³; $K_N^{ТЕС}$, $K_N^{ГЕС}$ – питомі капіталовкладення на 1 кВт установленної потужності відповідно ТЕС і ГЕС, у.о./кВт; $E_N^{ТЕС}$ і $E_E^{ТЕС}$ – коефіцієнт, що враховує більше споживання відповідно потужності і електроенергії на власні потреби ТЕС у порівнянні з ГЕС; $b_{з.нал.}$ – вартість 1 тонни замінюючого палива, у.о./т у.п.; $K_{ек}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення вартості ТЕС за рахунок компенсації екологічних збитків від забруднення шкідливими викидами (при порівнянні приймаємо 1).

При співставленні необхідно мати на увазі, що в прийнято $m = \frac{D}{\delta}$, а в формулі (13) $\delta_{OT} = \bar{\delta}D$, тобто співвідношення m і $\bar{\delta}$ обернене $m = \frac{1}{\bar{\delta}}$ або $\bar{\delta} = \frac{1}{m}$. Також в розрахунках були прийняті питомі вартісні показники для (12) в тотожному вигляді відповідно до сучасної практики проведення техніко-економічних розрахунків, як приведено в [8].

З метою аналізу впливу окремих складових у функції сумарних приведених затрат (4)-(6) та порівняння аналітичних методів визначення оптимальних діаметрів напірних тунелів ГЕС за залежностями (8)-(13) були виконані обчислення для напірного тунелю ГЕС Мткварі [11] за таких вихідних даних:

Середньоенергетична витрата ГЕС $Q_{сер.к.} = 57,0$ м³/с;

Коефіцієнт шорсткості $n = 0,011$;

Число годин використання установленної потужності $T = 8000$ год;

Коефіцієнт корисної дії агрегату $\eta_a = 0,936$;

ККД турбіни $\eta_T = 0,955102041$;

ККД генератора $\eta_r = 0,98$;

Питома вартість скельної виїмки ґрунту $a_{гp} = 20,00$ у.о./м³;

Питома вартість бетонного облицювання $a_{обл} = 60$ у.о./м²;

Коефіцієнт, що враховує місцеві втрати напору в долях від втрат по довжині $K_m = 1,1$;



Частка щорічних витрат від капіталовкладень по каналу $\alpha_{\delta}=0,1$;
Частка щорічних витрат від капіталовкладень по ГЕС $\alpha_{ГЕС}=0,15$;
Частка щорічних витрат від капіталовкладень по ТЕС $\alpha_{ТЕС}=0,27$;
Відношення внутрішнього діаметру тунелю до бетонного облицювання $m=3,333$;
Коефіцієнт дисконтування $E=0,1$;
Вартість 1 кВт·год електроенергії замінюючої ТЕС $bз.=0,01$ у.о./кВт·год;
Питомі замикаючі затрати на паливо замінюючої ТЕС $bз.пал.=75$ у.о./т у.п.;
Питомі капіталовкладення на 1 кВт установленої потужності ГЕС $=1200$ у.о/кВт;
Питомі капіталовкладення на 1 кВт встановленої потужності ТЕС $=500$ у.о/кВт;
Питома витрата умовного палива на виробництво 1 кВт·год електроенергії ТЕС $q=0,36$ кг/кВт·год;
Коефіцієнт, що враховує збільшення споживання на власні потреби потужності на ТЕС у порівнянні з ГЕС $E_N^{TEC}=1,12$;
Коефіцієнт, що враховує збільшення споживання на власні потреби потужності на ТЕС у порівнянні з ГЕС $E_E^{TEC}=1,03$;
Середньобагаторічний виробіток електроенергії $E=2800000000$ кВт·год;
Встановлена потужність ГЕС $N=500000$ кВт;
Статичний напір $H_{ст}=91$ м;
Напір з врахуванням збільшення тиску від гідравлічного удару $H_{уд}=118,3$ м;
Густина металу $\gamma_m=7,85$ т/м³;
Допустимі напруження $\sigma=800$ кг/см²;
Розрахунковий опір сталі $R_{ст}=78500000$ кг/см²;
Вартість металевої оболонки $a_{мет}=700$ у.о./т;
Коефіцієнт, що враховує додаткову вагу водоводу за рахунок елементів жорсткості і фасонних деталей опор $\psi=1,15$;
Перехідний коефіцієнт від капіталовкладень в споруди енергетичного водоводу до щорічних витрат $\alpha=0,03$.

Результати обрахунків, приведені у таблиці.

Таблиця

Визначення оптимального діаметру напірного тунелю ГЕС за різними аналітичними методами

Цільова функція	Двозатратна функція (4)			3-ох затратна функція (5) метод В.А. Орлова (12)	4-ох затратна функція (6) метод О.М. Яковлевої-Гаврилюк (13)	Емпірична залежність Д.С. Щавелева (10)
	Метод Ф.Ф. Губіна (8)	Метод М.Ф. Губіна (11)	Метод Бундшу (9)			
Параметр						
D_{opt} , м	4,73	4,45	3,94	4,43	5,23	4,06

Відповідно прийнятому в проекті ПАТ «Укргідропроєкт» внутрішньому діаметру напірного тунелю ГЕС Мткварі $D_{opt} = 5,26$ м [11] найбільш точним є аналітичний метод Яковлевої-Гаврилюк.

Як свідчать результати розрахунку, аналітичні методи на попередніх стадіях проектування дозволяють швидко визначити оптимальне значення площі поперечного перерізу водоводу. Аналіз різних методів розрахунку D_{opt} свідчить про те, що більш повне врахування складових затрат по замінуючій ТЕС, яка потребує постійних витрат на паливо, у функції сумарних приведених затрат по енергетичному водоводу, приводить до збільшення розмірів споруд ГЕУ, і у свою чергу до збільшення участі її потужності в енергосистемі, в цілому. Тобто, неповне врахування компенсації втрат напору і, відповідно, втраченої потужності ГЕС, приводить до необґрунтованого використання більш дорогих енергетичних ресурсів ТЕУ.

1. Гидроэлектрические станции / под ред. В. Я. Карелина, Г. И. Кривченко. М. : Энергоатомиздат, 1987. 464 с.
2. Pandey, Bikash and Karki, Ajoy. Hydroelectric Energy: Renewable Energy and the Environment. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017. 419 p.
3. Герасимов Г. Г., Герасимов Є. Г., Галкина Д. А. Оптимальный диаметр напірных трубопроводів гідроелектростанцій. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2016. Вип. 1(73). С. 41–49.
4. Губин Ф. Ф. Гидроэлектрические станции. М.–Л. : ГЭИ, 1949. 752 с.
5. Экономика гидротехнического и водохозяйственного строительства : учеб. для вузов / под общей ред. Д. С. Щавелева. М. : Стройиздат, 1986. 423 с.
6. Орлов В. А. Определение экономически наиболее выгодных сечений энергетических водоводов. *Гидротехническое строительство*. 1974. № 8. С. 35–39.



7. Орлов В. А. О точности определения расчетной скорости в энергетических водоводах гидроэлектростанций. *Гидротехническое строительство*. 1983. № 5. С. 15–21. **8.** Яковлева О. М. Деякі аспекти застосування аналітичних методів визначення оптимального діаметру напірних енергетичних водоводів. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Вип. 2 (46). Частина 1. Рівне : НУВГП, 2009. С. 128–137. **9.** Mosonyi E. *Wasserkraftwerke*, Band II. Budapest : Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, 1959. 1142 p. **10.** Яковлева О. М. Удосконалення аналітичних методів розрахунку гідравлічних параметрів енергетичних водоводів із урахуванням режимів течії : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.16. Рівне : НУВГП, 2013. 22 с. **11.** Вайнберг А. И. Методика расчетов сборной железобетонной обделки напорного гидротехнического туннеля. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2018. Вип. 178. С. 131–146. URL: <http://csw.kart.edu.ua/article/download/139465/136436/> (дата звернення: 26.04.2019).

REFERENCES:

1. Hydroelektrycheskye stantsyy / pod red. V. Ya. Karelyna, H. Y. Kryvchenko. M. : Enerhoatomyzdat, 1987. 464 s. **2.** Pandey, Bikash and Karki, Ajoy. *Hydroelectric Energy: Renewable Energy and the Environment*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017. 419 p. **3.** Herasymov H. H., Herasimov Ye. H., Halkyna D. A. Optymalniy diametr napirnykh truboprovodiv hidroelektrostantsii. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Rivne : NUVHP, 2016. Vyp. 1(73). S. 41–49. **4.** Hubin F. F. *Hidroelektricheskie stantsii*. M.–L. : HЭУ, 1949. 752 s. **5.** *Ekonomika hidrotekhnicheskoho i vodokhoziaistvennoho stroitelstva* : ucheb. dlia vuzov / pod obshchei red. D.S. Shchaveleva. M. : Stroizdat, 1986. 423 s. **6.** Orlov V. A. Opredelenie ekonomicheskoi naivyhodneishikh sechenii enerhetycheskikh vodovodov. *Hidrotekhnicheskoe stroitelstvo*. 1974. № 8. С. 35–39. **7.** Orlov V. A. O tochnosti opredeleniia raschetnoi skorosti v enerhetycheskikh vodovodakh hidroelektrostantsii. *Hidrotekhnicheskoe stroitelstvo*. 1983. № 5. С. 15–21. **8.** Yakovleva O. M. Deiaki aspekty zastosuvannia analitychnykh metodiv vyznachennia optymalnoho diametru napirnykh enerhetychnykh vodovodiv. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Vyp. 2 (46). Chastyna 1. Rivne : NUVHP, 2009. S. 128–137. **9.** Mosonyi E. *Wasserkraftwerke*, Band II. Budapest : Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, 1959. 1142 p. **10.** Yakovleva O. M. Udoskonalennia analitychnykh metodiv rozrakhunku hidravlichnykh parametriv enerhetychnykh vodovodiv iz urakhuvanniam rezhymiv techii : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.16. Rivne : NUVHP, 2013. 22 s. **11.** Vainberh A. I. Metodika raschetov sbornoi zhelezobetonnoi obdelki napornoho hidrotekhnicheskoho tunnelia. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT*. 2018. Vyp. 178. S. 131–146. URL: <http://csw.kart.edu.ua/article/download/139465/136436/> (data zvernennia: 26.04.2019).

Рецензент: д.т.н., професор Рябенко О. А. (НУВГП)

Yakovleva-Havryliuk O. M., Candidate of Engineering (Ph.D.) (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

ANALYTICAL METHODS USING IN DETERMINATION OF HPP'S TUNNELS OPTIMAL DIAMETERS

In the paper comparative economic efficiency criteria (in the Anglosphere institutional economics as a productive efficiency) are considered for optimal sizes determination of HPP's tunnels. The reduced cost of different energy objects (3) that generating electricity in grid are used as an objective function for optimal diameter definition. Two-part summary reduced cost function (4) is base for F.F.Gubin's (8) and M.F.Gubin's (11) analytical methods of HPP's tunnel optimal diameter definition. F.F.Gubin's two-part summary reduced cost function (4) include derivation cost (cost of building and exploitation tunnel) and cost of replaced Heat Power Plant (power plant which compensates for lost hydro power in grid due to head losses in the tunnel). Three-part summary reduced cost function (5) is base for Orloff's analytical method (12) of HPP's tunnel optimal diameter definition. Orloff included fuel cost for Heat Power Plant in reduced cost function additionally. The author offered to use the four-part reduced cost function (6) for tunnel optimal diameter definition (13). The four-part reduced cost function consist derivation cost, replaced Heat Power Plant cost, fuel cost for Heat Power Plant and cost of hydropower house linked with tunnel. Reduced cost function differentiation and solution of the equation (7) allowed authors to obtain analytical methods for determining the optimal diameter of the HPP's tunnel. The equation (7) are encompassed by the more general engineering concept that either HPP's structure parameter is efficient or optimal when it minimizes total cost for power production by the power industry. There are calculations of Mtkvari HPP's tunnel optimal diameter by foresaid analytical methods. In the table presents results of calculations by the foresaid methods (8), (11), (12), (13), and by the Bundshu's method (9) and by the Schaveleff's empiric formula (10). A comparative analysis of the results given in table allowed the author to make the following conclusion. The full account of the replaced Heat Power Plant reduced cost, which requires running fuel costs, in the objective function of the summary reduced cost for the power tunnel, leads to an increase in the size of the facilities HPP, and in



turn, to increase the participation of its power in the grid, in general. That is, incomplete consideration of compensation for head losses and, consequently, lost power of the HPP, leads to unreasonable use of more expensive energy resources Heat Power Plant.

***Keywords:* tunnel, Hydro Power Plant, diameter, optimization, reduced cost.**

Яковлева-Гаврилюк О. Н., к.т.н. (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ДИАМЕТРОВ НАПОРНЫХ ТУННЕЛЕЙ ГЭС

Рассмотрены аналитические методы разных авторов для определения оптимальных диаметров напорных туннелей ГЭС, которые разработаны на основании метода определения сравнительной экономической эффективности. Произведен анализ условий их применения для современных проектов ГЭС.

***Ключевые слова:* туннель, гидроэлектростанция, диаметр, оптимизация, приведенные затраты.**
