

Ю.Г. Качан, зав. кафедри, д.т.н., професор

В.Л. Коваленко, ст. викладач

С.А. Левченко, доцент, к.т.н.

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ НА ПРИКЛАДІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Запорізька державна інженерна академія

Приведены результаты определения параметров оптимальной системы гидро-энергетической утилизации для отдельного цеха промышленного предприятия метал-лургического профиля Запорожского региона.

Наведено результати визначення параметрів оптимальної системи гідроенергетичної утилізації для окремого цеху промислового підприємства металургійного профілю Запорізького регіону.

Вступ. Як було визначено у роботі [1], обсяг води на промислових підприємствах металургійного профілю Запорізького регіону, що можна використовувати як гідроенергетичний ресурс, становить близько 66 % від загального їх водоспоживання, а сумарна потужність водотоку перевищує 1,0 МВт, що цілком порівняно з потужністю гідроенергетичних станцій, які встановлюють у руслах малих річок. Утилізація такого гідроенергетичного ресурсу дозволить за попередніми оцінками виробляти щорічно до 10 млн. кВт·год., а її вартість за діючим тарифом на електроенергію для промислових підприємств складе 9,24 млн. грн.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розрахунок оптимальної системи утилізації вторинних гідроенергетичних ресурсів промислового підприємства металургійного профілю на прикладі цеху графітації ВАТ «Український графіт».

Головна частина досліджень. Водотоки зазначених підприємств, де є в наявності значні обсяги технічної води, після використання самопливом попадають на більш низькі рівні. Перепади між останніми можуть становити кілька десятків метрів, і, навіть, за невеликої витрати води розрахункові потужності водотоків виявляються значними [2]. Для більш точних розрахунків за об'єкт дослідження слід приймати не підприємство в цілому, а складові його цехів окремо. Потім, на основі проведених розрахунків, здійснюють висновок про обсяг гідроенергетичного потенціалу всього підприємства. Такий підхід дозволяє з достатньою точністю оцінити обсяг води, утилізація якої може розглядатися як джерело додаткового електропостачання металургійного підприємства.

Як приклад об'єкта гідроенергетичної утилізації, було розглянуто цех графітації, що входить до складу ВАТ «Український графіт». На його території розташовано наступне обладнання: електрокальцинатори, барабани-охолоджувачі, підшипники димососів, формувальна машина, системи охолодження, які є джерелами вторинної води з витратами від 20 до 50 м³/год. Відмітка висоти, з якої відбувається водовідведення коливається в межах 4,8...17,1 м.

Технічно, є можливим, зважаючи на наявність на площі цеху іншого технологічного обладнання та допоміжних споруд, розміщення центрів збору гідроресурсу лише у трьох точках. До того ж вищезазначене обладнання відноситься до так званих «заборонених зон», тобто місць неприпустимого розташування елементів системи гідроенергетичної утилізації (СГЕУ). Як було визначено у роботі [3], розташування

© Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Левченко С.А., 2012

таких зон прийнято задавати у вигляді паралелепіпедів, найбільш простим аналітичним описом яких є сигнатурна функція. Основні характеристики об'єкта, що є вихідними для визначення оптимальної СГЕУ, подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики джерел вторинної води

Джерело води	Координати джерел вторинної води, $x; y; z$, м	Гранична витрата, $Q_{к,мак}$, м ³ /год.	Напір, м
Електрокальцінатори	23,5; 55,0; 19	50	17,1
	49,5; 55,0; 19	50	17,1
	36,5; 55,0; 19	50	17,1
	62,5; 55,0; 19	50	17,1
	75,5; 55,0; 19	50	17,1
	88,5; 55,0; 19	50	17,1
Барабани-охолоджувачі	21,75; 41,5; 6	30	5,0
	34,75; 41,5; 6	30	5,0
	47,75; 41,5; 6	30	5,0
	60,75; 41,5; 6	30	5,0
	73,75; 41,5; 6	30	5,0
	86,75; 41,5; 6	30	5,0
Формовочна машина	65; 28; 11	20	10,0
Підшипники димососів	108,0; 26,0; 6	28,8	4,8
	108,0; 23,0; 6	108,0	26,0
	108,0 20,5; 6	108,0	26,0
	108,0; 17,5; 6	108,0	26,0
	108,0; 14,0; 6	108,0	26,0

Примітка: габаритні розміри об'єкту (цеху) – 115 x 60 x 22 м;
координати центрів збору $(x,y)_p$, м: 105; 55; 95; 32; 25; 10

Характеристики оптимальної СГЕУ на першому етапі розраховували на умовно постійне максимальне значення витрати, тобто без врахування динаміки потоку. Так, згідно з останнім, для об'єкта, що розглядається, визначають всі можливі комбінації об'єднання джерел вторинної води k з центрами збору p . В даному разі загальна їх кількість r буде дорівнювати [4-6]: $r = p^k$.

Для першої комбінації розподілення джерел по центрах збору (ЦЗ) здійснювали таким чином: ЦЗ № 1 – електрокальцінатори; ЦЗ № 2 – підшипники димососів, барабани-охолоджувачі, формовочна машина; ЦЗ № 3 – джерела відсутні.

Розрахунок необхідного діаметра трубопроводу від електрокальцінаторів № 1-6 до ЦЗ № 1 для забезпечення необхідної пропускної спроможності виконували за формулою [7]:

$$d_{кр} = 2 \left(\frac{Q_{к,мак}}{\pi \cdot v_{к}} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

де $Q_{к,мак}$ – величина максимальної витрати для даного джерела; $v_{к}$ – швидкість руху рідини в трубопроводі, для безнапірного руху швидкість водотоку $v_{к} = 0,1 \dots 0,3$ м/с, для напірного $v_{к} = 1,1 \dots 1,3$ м/с [8].

Виходячи з розрахованого діаметра $d_{кр}$, вибирають найближчий, але більший за діаметром стандартний трубопровід.

Надалі визначають відстань l_{kp} між джерелами k та центрами збору p за їх заданими координатами. Для цього, згідно з алгоритмом, розробленим у роботі [9], простір цеху розбивають на куби із загальною кількістю вузлів в їх вершинах (точки прокладання трас трубопроводів):

$$l_{kp} = \left[(x_k - x_p)^2 + (y_k - y_p)^2 + (z_k - z_p)^2 \right]^{0,5}, \quad (2)$$

де $x_k, y_k, z_k, x_p, y_p, z_p$ – координати джерел і центрів збору відповідно; Δ – крок змінювання координат, приймаємо $\Delta = 1$ м.

Множину шляхів можливого прокладання трас трубопроводів, що проходять через одержані таким чином вузли, генерують на наступному кроці. Як результат відсіювання маршрутів, точки яких належать забороненим зонам розташування j -го обладнання СГЕУ із застосуванням сигнатурної функції, визначено, що найкоротшим є шлях довжиною 83,7 м.

Потім визначають характеристики потоку рідини в трубопроводі. Швидкість руху води:

$$v_l = \left(\frac{8g}{\lambda} \cdot R \cdot i \right)^{0,5}, \quad (3)$$

де $\left(\frac{8g}{\lambda} \right)^{0,5} = C$ – коефіцієнт Шезі (визначають за формулою Павловського [8]: коли $0,1 < R < 3$ м, то $C = R^y / n$, $y = 2,5n^{0,5} - 0,13 - 0,75R \cdot (n^{0,5} - 0,1)$, n – коефіцієнт шорсткості, $n = 0,013$, R – гідравлічний радіус, $R = \omega / \chi$, ω – площа поперечного перерізу потоку, χ – змочений периметр, i – гідравлічний ухил.

Площу поперечного перерізу потоку визначають як:

$$\omega = 0,785 d_{kp}^2 \cdot \frac{\phi}{2\pi} + 0,5 \left(h - \frac{d_{kp}}{2} \right) \cdot 2 \left[\left(\frac{d_{kp}}{2} \right)^2 - \left(h - \frac{d_{kp}}{2} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (4)$$

де ϕ – кут між повздовжньою віссю трубопроводу та точкою дотику вільної поверхні води, h – глибина заповнення трубопроводу.

Загальні втрати напору в трубопроводі $H_{втр}$ складаються з місцевих $\sum h_m$ і лінійних втрат H_l :

$$H_{втр} = \sum h_m + H_l. \quad (5)$$

Втрати напору за довжиною трубопроводу визначають за формулами:

$$H_{l, kp} = \lambda \cdot \frac{l_{kp}}{d_{kp}} \cdot \frac{v_k^2}{2g}, \quad (6)$$

$$H_{l, kp} = \frac{v_k^2 \cdot l_{kp}}{C^2 \cdot K}, \quad (7)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя, що враховує вплив на втрату напору за довжиною трубопроводу всіх факторів, визначальними з яких є в'язкість рідини та стан стінок трубопроводу, за формулою А.Д. Альтштуля [8]:

$\lambda = 0,11(\kappa_e / d + 68 / Re)^2$, κ_e – еквівалентна рівномірно-зерниста абсолютна шорсткість.

Під час гідравлічного розрахунку як напірних, так і самопливних мереж враховують місцеві втрати напору, що визначають за формулою Вейсбаха [8]:

$$h_m = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (8)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору, який залежить від значення числа Рейнольдса.

Потужність водотоку джерела вторинної води $N_{\kappa\gamma}$ з урахуванням втрат енергії в елементах системи збору визначають як:

$$N_\gamma = \sum_{p=1}^q N_{p\gamma}. \quad (9)$$

Після визначених параметрів сумарного вторинного водотоку, що надходить в ЦЗ № 1 від електрокальцінаторів, підбирають обладнання для гідроенергетичної утилізації, а саме мікро-ГЕС модульного типу. Для вищезазначених характеристик потоку вибирають агрегат типу 20 ПрД з турбіною діагонального типу. Номінальні витрати коливаються у межах 0,08...0,17 м³/с, напори – 8,0...18,0 м, потужність – 10,0...20,0 кВт.

Енергію, що виробляється генератором мікро-ГЕС, визначають за формулою [10]:

$$W_p = N_p \cdot T \cdot \eta_{pm} \cdot \eta_{pg}, \quad (10)$$

де T – фонд робочого часу підприємства (для трьохзмінного графіку дорівнює 8760 годин), η_{pm} , η_{pg} – ККД турбіни та генератора відповідно.

Капітальні вкладення на одержання електричної енергії з наведеного водотоку будуть складатися з витрат на енергомодуль мікро-ГЕС, з'єднуючі трубопроводи, вартість робіт з монтажу та поточного обслуговування. Вартість монтажних і пуско-налагоджувальних робіт, у даному разі, становить 7,5 %, а на поточний ремонт та обслуговування основних фондів – 5 % від капітальних витрат, вартість мікро-ГЕС типу 20 ПрД виробництва МНТО «ИНСЕТ» – 183 тис. грн., питома вартість трубопроводу діаметром 325 мм за даними БМУ «Запоріжстальбуд-1» – 661992 грн./км.

Для ЦЗ № 2 одержуємо наступні техніко-економічні показники: вартість мік-ро-ГЕС типу 10 Пр, що застосовується для утилізації енергії сумарного водотоку з параметрами $Q_\Sigma = 96$ м³/с і $H_\Sigma = 5,2$ м складає 102,4 тис. грн., при цьому капітальні витрати становлять 159,75 тис. грн. і, відповідно, поточні витрати – 7,15 тис. грн., а річна кількість електроенергії, що виробляється, дорівнює 34256 кВт·год.

Собівартість електричної енергії C_{EE} , яка виробляється всією СГЕУ, визначається за формулою:

$$C_{EE} = \frac{K_n}{W}, \quad (11)$$

де K_n – поточні витрати, $K_n = \sum_{p=1}^q K_{np}$; W – кількість електроенергії, що виробляють

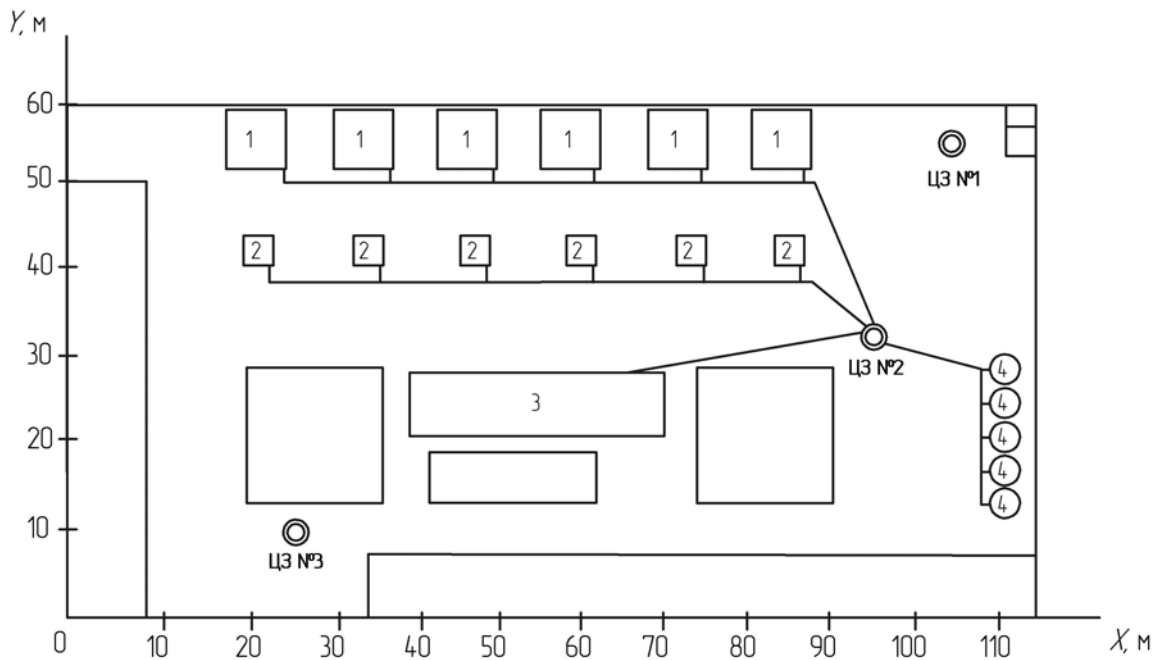
за час T , $W = \sum_{p=1}^q W_p$.

В результаті обчислювальних операцій за вищенаведеним алгоритмом було визначено характеристики всіх можливих варіантів топології СГЕУ для об'єкту, що розглядають. Останні визначаються комбінаціями об'єднання джерел вторинної води з центрами збору гідроресурсу з урахуванням обмежень на місця розташування її елементів. Деякі з варіантів, для яких собівартість вироблення електроенергії не перевищує встановлений тариф з мережі $C \leq C_m$ (для промислових підприємств станом на 01.11.2011 р. – 0,9237 грн./(кВт·год.) [11]), наведено у табл. 2.

Очевидно, що під час визначення оптимальної СГЕУ вибирають найвигідніший за економічним критерієм варіант топології такої системи, тобто повинна виконуватися умова: кількість електричної енергії, що виробляють за рахунок гідроенергетичної утилізації, має бути максимально можливою, а її собівартість не перевищувати діючий тариф на електроенергію для даного промислового підприємства. Встановлено, що найбільш економічно вигідна система технічно складається із джерел вторинної води, з'єднаних трубопроводами з центром збору № 2 (рис. 1). Центри збору ЦЗ № 1 і № 3 залишаються незадіяними. Таким чином, передбачувані сумарні капітальні вкладення в оптимальну СГЕУ для даного об'єкту гідроенергетичної утилізації складають 168817,59 грн. за собівартості електроенергії 0,30 грн./(кВт·год.) згідно з діючою на 1.11.2011 р. вартістю обладнання, робіт з монтажу й обслуговування.

Таблиця 2 – Техніко-економічні показники проектів гідроенергоутилізації для цеху графітації ВАТ «Український графіт»

Номер варіанту	Вироблення електричної енергії, тис. (кВт·год.)/рік	Собівартість електроенергії, грн./(кВт·год.)
1	135,153	0,28
2	135,200	0,28
3	135,169	0,29
4	134,927	0,29
5	135,054	0,29
6	134,948	0,29
7	134,984	0,29
8	134,626	0,29
9	134,594	0,29
10	135,169	0,29
11	135,216	0,297
12	135,195	0,31
13	134,911	0,32
14	134,885	0,35
15	134,932	0,63
16	134,340	0,72
17	132,139	0,91



1 - електрокальцінатори; 2 - барабани-охолоджувачі; 3 - формовочна машина;
4 - підшипники димососів.

Рисунок 1 – План розташування обладнання цеху графітації із зображенням оптимальної за економічним критерієм СГЕУ

Основні параметри елементів оптимальної системи збору гідроресурсів та обладнання для гідроенергетичної утилізації зведено до табл. 3.

Таблиця 3 – Параметри обладнання оптимальної СГЕУ цеху графітації ВАТ «Український графіт»

Центр збору – джерело		Діаметр трубопроводу d , м	Довжина l , м	Тип мікро-ГЕС
№ 1	незадіяний			
№ 2	електрокальцінатори	0,325	76,12	10Пр
	барабани-охолоджувачі	0,273	73,83	
	формовочна машина	0,076	31,06	
	підшипники димососів	0,219	22,29	
№ 3	незадіяний			

Висновки. Розрахунки на прикладі промислового підприємства металургійного профілю показали, що техніко-економічні показники системи утилізації вторинних гідроенергетичних ресурсів значно коливаються залежно від конфігурації системи збору, топології розташування електрогенеруючого обладнання, вартості монтажних і пуско-налагоджувальних робіт. Впровадження зазначених систем з оптимізованими структурою та параметрами є, як правило, економічно доцільним і призводить як до енергетичної незалежності промислових підприємств, так і до зменшення витрат останніх на енергоресурси взагалі.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коваленко, В. Л. Об оценке потенциала вторичного гидроэнергетического ресурса пред-приятия [Текст] / В. Л. Коваленко, Ю. Г. Качан // Відновлювана енергетика. – 2009. – № 2. – С. 54-58.
2. Віхорєв, Ю. О. Перспективи використання енергії водотоків технічних систем водопоста-чання і водовідведення [Текст] / Ю. О. Віхорєв, А. П. Ільяшенко // Проблеми загальної енергетики. – 2002. – № 7. – С. 29-33.
3. Коваленко, В. Л. О задании ограниченной в задаче оптимизации системы утилизации вто-ричного гидроэнергетического ресурса [Текст] / В. Л. Коваленко, Ю. Г. Качан // Інтегро-вані технології та енергозбереження. – 2009. – № 2. – С. 44-46.
4. Андерсон, Д. Дискретная математика и комбінаторика [Текст] : учеб. / Д. Андерсон. – М. : Вильямс, 2006. – 960 с. – Библиогр. : с. 432-438. – ISBN 5-030011348-2.
5. Стенли, Р. Перечислительная комбінаторика [Текст] : учеб. пособие / Р. Стенли. – М. : Мир, 1990. – 440 с. – Библиогр. : с. 954-959. – ISBN 978-966-351-127-6.
6. Kreher, D. L. Combinatorian algorithms: Generation, Enumaration and Search [Text] / D. L. Kreher, D. S. Stinson. – CRC Press, 1998. – 329 p. – P. 320-328.
7. Мезенцев, А. В. Гидравлика с основами гидротехники [Текст] : учеб. пособие / А. В. Ме-зенцев, В. Н. Петрова. – К. : Техніка, 2007. – 234 с. – Библиогр. : с. 230-234. – ISBN 8-3474-573-114-7.
8. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика [Текст] : учеб. / Д. В. Штеренлихт. - 3-е изд., перераб. – М. : Колос, 2004. – 656 с. – ISBN 5-9532-0142-7.
9. Коваленко, В. Л. Алгоритм синтезу оптимальної системи утилізації вторинного гідро-енергетичного ресурсу [Текст] / В. Л. Коваленко, Ю. Г. Качан // Меліорація та гідротех-нічне будівництво : міжвід. наук.-техн. зб. – Рівне : НУВГП, 2010. – Вип. 34. – С. 72-77.
10. Гидроэнергетика [Текст] : учеб. пособие / Под ред. В. И. Обрезкова. – М. : Энергоиздат, 1981. – 608 с. – Библиогр. : с. 603-607.
11. Національна комісія регулювання електроенергетики України. Щодо затвердження на листопад роздрібних тарифів на електроенергію [Електронний ресурс] / Постанова № 1267 від 22.10.2011. – Режим доступу : [\www/ ttp://nerc.gov.ua/control/uk/-publish /article/](http://www.nerc.gov.ua/control/uk/-publish/article/) – Загл. с екрана.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2011 р.
Рецензент, проф. О.В. Волков