

УДК 556.162.048

П.Ф.Васько, докт.техн.наук, А.О.Бриль, А.В.Мороз (Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Визначення гідроенергетичного потенціалу малих річок за довільної забезпеченості витрат води

Розроблені теоретичні положення розрахунку гідроенергетичного потенціалу водотоків малих річок за довільної забезпеченості витрат води. Для визначення імовірнісних параметрів витрат застосовано трипараметричний гама-розподіл у формі Крицького-Менкеля. Побудову вертикального профілю річки здійснено за результатами космічного зондування земної поверхні.

Разработаны теоретические положения расчёта гидроэнергетического потенциала водотоков малых рек при различной обеспеченности стока воды. Для определения вероятностных параметров стока применено трёхпараметрическое гамма-распределение в форме Крицкого-Менкеля. Построение вертикального профиля реки осуществлено по результатам космического зондирования земной поверхности.

Постановка задачі. Введення в дію на території України "зеленого" тарифу на електроенергію від поновлюваних джерел стимулювало підвищений інтерес до відновлення занедбаних та спорудження нових малих гідроелектростанцій (МГЕС). Даний тариф передбачає продаж виробленої електроенергії в енергоринок, що зумовлює функціонування МГЕС у складі промислової електросистеми. Режими експлуатації станції повинні забезпечити найшвидше повернення капіталу, інвестованого в її будівництво. Вибір номінальної потужності станції та розробка оптимальних режимів експлуатації потребують знання гідроенергетичного потенціалу річки з урахуванням санітарного пропуску води, витрат води в межень та повінь, коли не вся вода використовується турбінами. Кількісна оцінка вказаних факторів може бути зроблена шляхом застосування імовірнісного підходу до витрат води річкового стоку в місці спорудження станції протягом року. Найбільш повне використання енергії водотоку річки досягається в результаті будівництва каскаду МГЕС за умов наявності сприятливого вертикального профілю уздовж течії та рельєфу місцевості.

В даній роботі розглянуто основні теоретичні положення розрахунку гідроенергетичного потенціалу водотоків малих річок за довільної забезпеченості витрат води та побудови вертикального профілю річки і рельєфу місцевості за

результатами космічного зондування земної поверхні.

Основні положення визначення теоретичного значення гідроенергетичного потенціалу малих річок за довільної забезпеченості стоку води розглянемо на прикладі ділянки ріки L_{12} , яка обмежена близькими один до одного створами 1-1 та 2-2, через які проходить деякий об'єм води W , m^3 за інтервал часу T , с (рис.1).

Потенціальна валова енергія потоку E_{12} , яка втрачається на відрізьку L_{12} , дорівнює [1, 2]:

$$E_{12} = \rho g W (\nabla z_1 - \nabla z_2) = \rho g W H_{12}, \quad (1)$$

де ρ – густина рідини, kg/m^3 ; g – прискорення вільного падіння, m/s^2 ; W – об'єм води, m^3 ; $H_{12} = \nabla z_1 - \nabla z_2$ – питома потенціальна енергія потоку рідини, яка називається напором та чисельно дорівнює падінню рівнів вільної поверхні водотоку на ділянці L_{12} .

Середня потужність N_{12} водотоку дорівнює:

$$N_{12} = \frac{E_{12}}{T} = \rho g \frac{W}{T} H_{12} = \rho g Q_{12} H_{12}. \quad (2)$$

Оскільки витрати води по довжині ділянки змінюються, то для розрахунку N_{12} та E_{12} використовують метод "лінійного обліку", тобто характер зміни витрат уздовж ділянки припускають лінійним, а розрахункові витрати визначаються як середнє значення:

$$\overline{Q}_{12} = 0,5(Q_1 + Q_2). \quad (3)$$

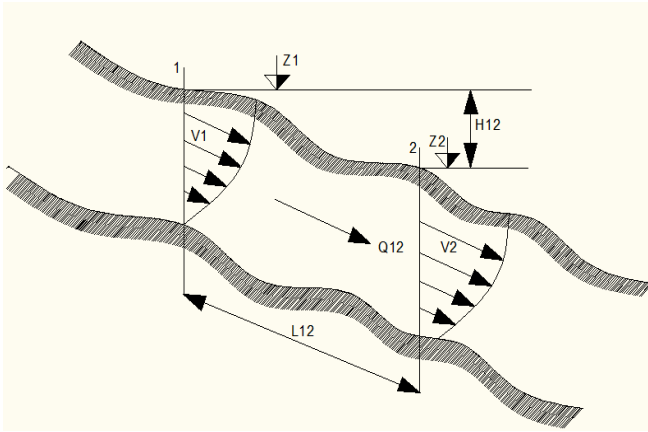


Рис. 1. До розрахунку гідроенергетичного потенціалу водотоку.

Для розрахунку напорів H необхідно мати поздовжній профіль водотоку із зазначенням місцерозташування розрахункових створів та зміною рівнів поверхні води по довжині водотоку, тобто $\nabla z = \nabla z(L)$, де L – відстань в км від деякого початкового створу, прийнятого за нуль відліку.

Розрахунок витрат води Q в кожному j -му створі може виконуватись на підставі результатів гідрологічних спостережень, якщо в цих створах є водомірні пости. В інших випадках використовуються карти з ізолініями модулів середньорічного стоку m в даному басейні річки. За допомогою карт визначається водозбірна поверхня басейну для кожного j -го створу F_j та відповідний йому модуль стоку m_j . В цьому випадку Q_j розраховується за формулою:

$$Q_j = m_j F_j. \tag{4}$$

На сьогодні для визначення площі водозбірної поверхні басейну та вертикального профілю річки доцільно застосовувати сучасні методи інженерної гідрології та комп'ютерних технологій на основі цифрових топографічних карт, отриманих шляхом аерокосмічного зондування земної поверхні. Так, супутникова технологія зондування

на даний час характеризується роздільною здатністю 0,5 м, що цілком задовольняє потреби розробників на етапі техніко-економічних обґрунтувань гідроенергетичних проектів. В Україні у даній галузі функціонує Державний науково-виробничий центр аерокосмічної інформації, дистанційного зондування Землі і моніторингу оточуючого середовища "Природа" Національного космічного агентства України та Міністерства охорони оточуючого природного середовища [3].

Розглянуті теоретичні положення розроблені для розрахунку повної енергії водотоку. Але вони не дають відповіді на питання, яка частина цієї енергії може бути використана для подальшого перетворення в електричну енергію. Так, наприклад, великі обсяги короткотривалих повеневих вод, довготривалі меженні витрати та санітарні пропуски води проходять поза турбінами ГЕС. Для врахування цих складових водотоку введемо в розрахунок, додатково до викладеного вище, витрати води заданого рівня забезпеченості річкового стоку [4], який являє собою імовірність перевищення заданої величини витрат води: Q_p – витрати води p -го рівня, p – величина рівня забезпеченості.

Рівень забезпеченості витрат річкового стоку визначається як

$$p = 1 - F(x), \tag{5}$$

де $F(x)$ – функція розподілу імовірностей витрат води річкового стоку.

При проведенні гідрологічних розрахунків найбільшого поширення на території країн СНД набув імовірнісний трипараметричний гамарозподіл витрат води річкового стоку в формі Крицького-Менкеля [1, 2, 4], функція якого має вигляд [5]:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < 0 \\ \left[\frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{\frac{\gamma}{b}} \frac{1}{\Gamma(\gamma) \bar{X} b} \int_0^x e^{-\left[\frac{\Gamma(\gamma + b)t}{\Gamma(\gamma) \bar{X}} \right]^{\frac{1}{b}}} \left(\frac{t}{x} \right)^{\frac{\gamma}{b} - 1} dt, & \text{при } x \geq 0 \end{cases}, \tag{6}$$

де \bar{X} – середнє значення випадкової величини; γ, b – параметри розподілу;

$\Gamma(\dots)$ – символ гама-функції відповідного аргументу.

Параметри розподілу γ , b знаходяться як рішення системи трансцендентних рівнянь для заданих значень коефіцієнта варіації C_v та коефіцієнта асиметрії C_s :

$$C_v = \left[\Gamma(\gamma) \Gamma(\gamma + 2b) / \Gamma^2(\gamma + b) - 1 \right]^{1/2}; \quad (7)$$

$$C_s = \frac{\Gamma^2(\gamma) \Gamma(\gamma + 3b) / \Gamma^3(\gamma + b) - 3\Gamma(\gamma) \Gamma(\gamma + 2b) / \Gamma^2(\gamma + b) + 2}{\left[\Gamma(\gamma) \Gamma(\gamma + 2b) / \Gamma^2(\gamma + b) - 1 \right]^{3/2}}. \quad (8)$$

Значення коефіцієнтів варіації та асиметрії визначаються за результатами спостережень згідно нормативного документу [6] з використанням методу найбільшої правдоподібності або методу моментів.

Алгоритми визначення заданого рівня забезпеченості для довільних значень коефіцієнтів варіації та асиметрії наведено в [7, 8].

Визначення вертикального профілю малих річок за даними космічного зондування земної поверхні. Результати аерокосмічного зондування земної поверхні території України можуть бути отримані в ДНВЦ "Природа" [3], проте ініціативний характер даного дослідження не передбачав витрат на придбання такої інформації, що зумовлено значною вартістю замовлення. Тому використовувалися загальнодоступні результати зондування та відповідні програмні засоби для його обробки, зокрема, цифрова карта та україномовна версія програми *Google Earth* 6.0.3.2197 [9]. Програма доступна у трьох різних варіантах: *Google Планета Земля*, *Google Планета Земля Про* та *Google Планета Земля для підприємств*. Безкоштовною є тільки *Google Планета Земля*. Інші дві версії можуть бути замовлені на офіційному сайті програми за кошти.

Картографічний ресурс складається з бази даних дистанційного зондування і топографічних карт (*Satellite* і *Map*). Сервер *Google Earth* <http://earth.google.com/> працює з даними за допомогою спеціальної програми-навігатора, що вимагає окремої інсталяції. Можливості програми значно перевершують web-сервіс як набором даних,

так і наявністю додаткових інструментів (вимірювання, робота з GPS). Поява *Google Earth* привела до популяризації формату KML (*Keyhole Markup Language*), що являє собою розширення XML, розроблене спеціально для збереження та опису векторних просторових даних. Популярність формату на сьогоднішній день така, що імпорт та експорт в нього вбудований у найпоширеніші пакети геоінформаційних систем (ГІС); існує ряд загальнодоступних конвертерів для переводу даних з інших форматів у формат KML.

Основа даних представляють супутникові знімки *Landsat*, *SPOT*, *Quickbird* і топографічні карти. Будь-яка точка світу відображається з точністю до 1:25000 на основі даних, отриманих після 1999 року. Ці знімки надані компанією *EarthSat* і зроблені з супутника *Landsat-7* камерою ETM. Великі міста і багато території відображаються аж до масштабів порядку 1:2000, що зроблено компанією *DigitalGlobe* за допомогою супутника *Quickbird-2* з використанням камери VHRC-60. Роздільна точність цих знімків складає 0,68 м. Іншими джерелами інформації слугують дані *SPOT* і аерофотозйомки.

Спочатку розглянемо безпосередню побудову вертикального профілю малої річки. Для цього необхідно відкрити відповідний розділ програми та показати шлях уздовж річки, намагаючись поставити точки на середину водотоку, оминаючи насипи та береги. Після збереження інформації відкриваємо вертикальний профіль зазначеного шляху, показаний на рис. 2.



Рис. 2. Приклад безпосередньої побудови вертикального профілю річки вздовж течії.

На рис. 2 зображено профіль та параметри рельєфу зазначеного шляху, а також наступна інформація:

1. Профіль рельєфу річки. Вісь Y графіка показує висоту, а вісь X – відстань. При переміщенні курсора за профілем рельєфу відображається висота (зліва від стрілки) і сукупна відстань (над стрілкою). Число перед знаком % представляє відсоток ухилу.

Якщо потрібно вибрати певну частину шляху, то достатньо потримати ліву кнопку миші при переміщенні курсора над необхідної областю, а потім відпустити кнопку. Показники над графіком будуть відображені для даної частини шляху, а на самому графіку цей розділ буде виділено.

2. Дата отримання зображення на мапі.

3. Координати та висота над рівнем моря точки, яка представлена на графіку (точка 212 м).

4. Висота над рівнем моря камери.

5. Мінімальні, середні та максимальні значення графіка.

6. Параметри досліджуваної ділянки: відстань, км (тобто, довжина шляху); підвищення та зниження рельєфу, м; максимальний та середній ухил, %.

7. Параметри точки: висота над рівнем моря, відсоток ухилу, відстань від початку зазначеного шляху.

Отриманий профіль характеризується наявністю досить значних викидів по вертикалі, які спотворюють загальний тренд рельєфу. В такому вигляді рельєф не відповідає дійсності, оскільки в залежності від розпізнавальної здатності електронної карти та дій оператора персонального комп'ютера визначені на моніторі точки вимірювань могли "влучити" на поверхню берегів річки. Зазначена властивість буде спостерігатися в більшій мірі зі зменшенням ширини досліджуваної річки. Тому побудову вертикального профілю безпосередньо вздовж русла можна вважати недоцільною для малих річок.

Інший підхід до побудови вертикального профілю ділянки малої річки ґрунтується на можливостях програмного забезпечення автоматично визначати рельєф місцевості в заданій площині. В даному випадку оператору потрібно задати лише параметри площини і в перетині місцевості будуть відображатися всі точки, згідно роздільної здатності розпізнавання електронної карти, сукупність яких являє собою рельєф досліджуваної місцевості в заданій площині. Якщо площину розмістити перпендикулярно руслу навіть неширокої річки, то висота русла над рівнем моря визначається однозначно з похибкою роздільної здатності карти (рис. 3). Визначивши таким чином параметри русла для ряду точок уздовж річки, можна побудувати потрібний вертикальний профіль.

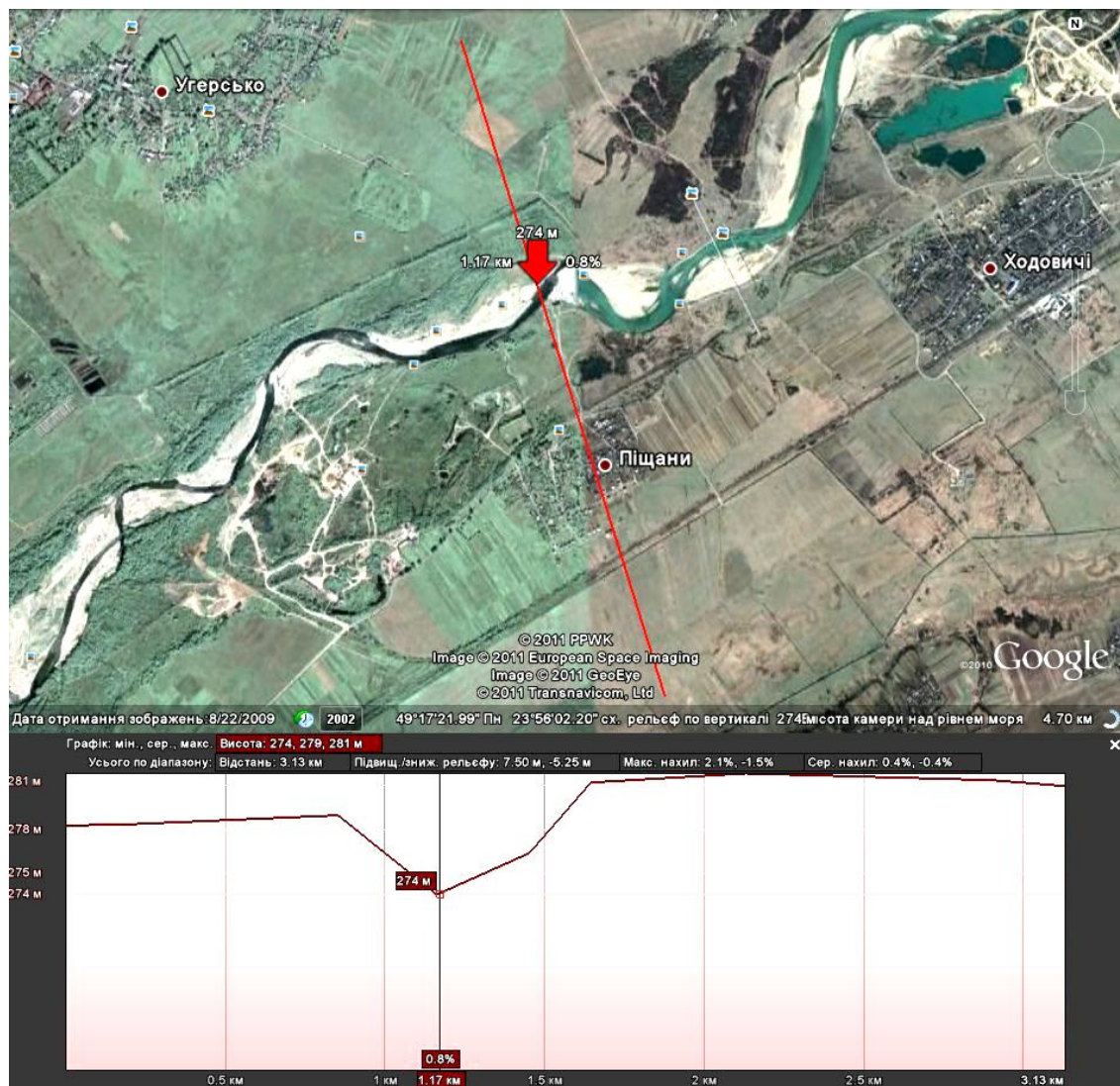


Рис. 3. Приклад поперечного профілю рельєфу долини малої річки Стрий.

Щоб отримати більш детальні дані профілю річки необхідно використовувати програму *Google Планета Земля для підприємств*, які надаються на платній основі та дозволяють отримати зображення з більш високою роздільною здатністю.

Даний метод побудови вертикального профілю річки, тобто падіння рівнів вільної поверхні водотоку, дає змогу виконати аналіз гідроенергетичного потенціалу на заданій ділянці з метою обґрунтування доцільності використання водних ресурсів річки в енергетичних цілях.

За приклад, побудуємо вертикальний профіль малої річки Стрий, яка тече по Львівській області та є правою притокою річки Дністер. Довжина річки Стрий складає 232 км, а площа басейну дорівнює 3060 км². Річка Стрий починається у Східних Карпатах на схилах вершини Зелений Явір-

ник. Головними її притоками є річки Опір, Крушельниця та Велика Річка. На річці розташовані міста Турка, Стрий та Жидачів. Побудову виконаємо на основі сукупності поперечних профілів рельєфу річки, як показано на рис. 3. Параметри русла наведені в табл.1, а вертикальний профіль річки Стрий, побудований відповідно до цих даних, показано на рис. 4.

Розрахункові дослідження теоретичного значення гідроенергетичного потенціалу виконаємо також для річки Стрий, вертикальний профіль якої побудовано. Гідрологічні параметри річкового стоку в пункті виміру в с. Новий Кропивник та с. Межиріччя дорівнюють наступним значенням відповідно:

$$\bar{Q} = 19,2 \text{ м}^3/\text{с}; C_V = 0,36; C_S/C_V = 0,3$$

та

$$\bar{Q} = 34 \text{ м}^3/\text{с}; C_V = 0,4; C_S/C_V = 0,6.$$

Розрахунки проведемо для трьох рівнів забезпеченості витрат стоку води, а саме – 75%, 50%, 25%. Цей діапазон зміни забезпеченості відповідає досвіду будівництва малих ГЕС та нинішнім умовам функціонування станцій у складі сучасних промислових електросистем.

Визначення потужності та енергії водотоку малої річки, яка в подальшому підлягає перетворенню в електричну енергію, виконаємо за припущення, що малі ГЕС будуть споруджуватись у складі трьох гідроелектричних агрегатів.

Таблиця 1. Параметри вертикального профілю річки Стрий

№ п/п	Населений пункт	Висота над рівнем моря, м	Довжина річки від гирла, км	Примітка
1	Матків	651	199,57	притока р. Сможенка
2	Верхнє Висоцьке	627	191,96	
3	Заріччя	589	175,35	притока р. Гнила
4	Ропавське	585	170,68	
5	Турка	560	153,74	
6	Стоділка	537	147,57	
7	Ісаї	526	140,59	
8	Ясениця	521	136,13	
9	Ластівка	509	130,45	
10	Підсухе	495	121,09	
11	Новий Кропивник	477	115,88	
12	Довге	455	104,98	притока р. Рибнік
13	Підгородці	427	96,74	притока р. Уричанка
14	Крушельниця	405	87,65	
15	Межироди	373	78,67	притока р. Опір
16	Розгірче	381	71,35	притока р. Стинівка
17	Стрий	293	47,75	
18	Піщани	274	37,14	
19	Гніздичів	253	22,56	
20	Іванівці	246	14,1	
21	Межиріччя	243	5,48	
22	Заліски	242	0	впадає в р. Дністер

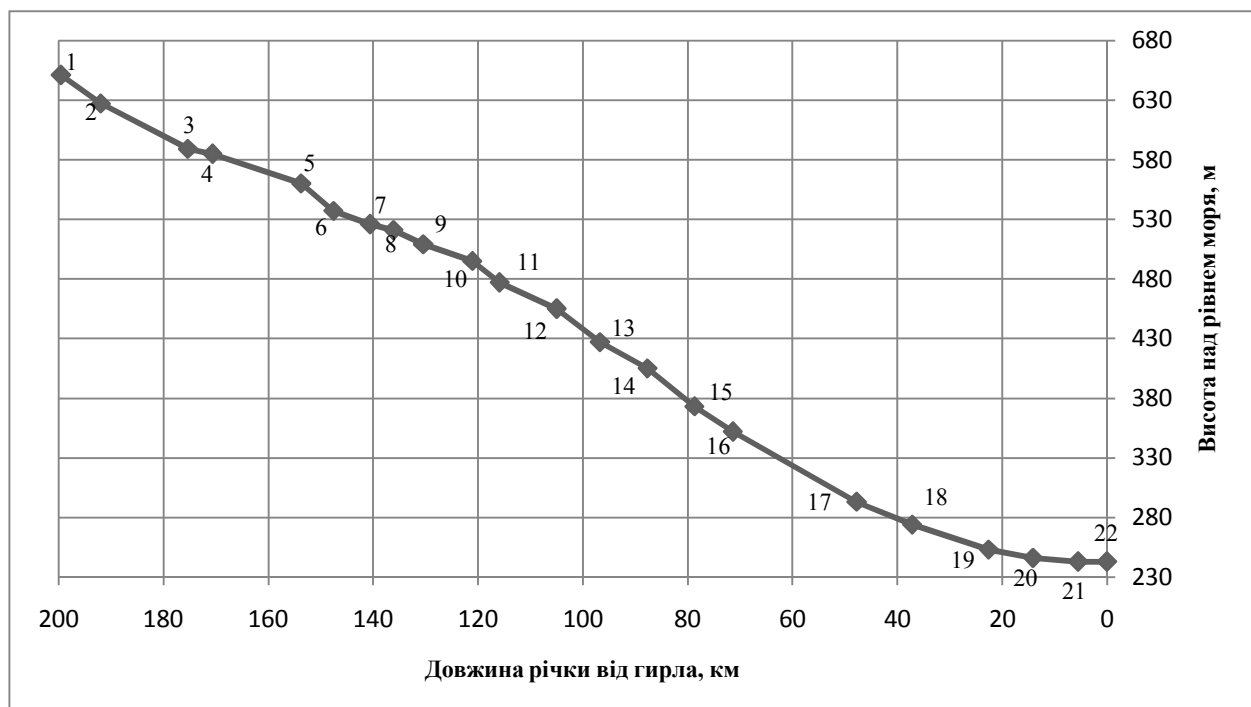


Рис. 4. Вертикальний профіль річки Стрий.

Таблиця 2. Гідроенергетичний потенціал річки Стрий

Річка, розташування пункту виміру	Багаторічні характеристики річкового стоку			Потужність річки за різної забезпеченості стоку N , МВт			Річний обсяг енергії річки за різної забезпеченості стоку E , млн кВт·год/рік		
	Q_0 , м ³ /с	C_V	C_S/C_V	75%	50%	25%	75%	50%	25%
Стрий: с. Матків – с. Н. Кропивник	19,2	0,36	0,3	9,02	11,91	14,85	69,75	79,27	80,24
Стрий: с. Н. Кропивник – с. Заліски	26,6	0,4	0,5	31,96	44,56	57,16	244,47	290,14	297,09
Всього	–	–	–	40,98	56,47	72,01	314,22	369,41	377,33

Введемо додаткові позначення параметрів, що будуть використовуватись у розрахунках:

N_p – потужність водотоку, відповідно p -му рівню забезпеченості витрат води;

E_p – річний обсяг енергії водотоку p -го рівня забезпеченості витрат води, придатний до перетворення в електричну енергію;

Q_{p1} – витрати води p -го рівня забезпеченості, що достатні для функціонування в складі станції одного гідроагрегата;

Q_{p2} – витрати води p -го рівня забезпеченості, що достатні для функціонування в складі станції двох гідроагрегатів;

p_1 – забезпеченість витрат води Q_{p1} (рис. 5);

p_2 – забезпеченість витрат води Q_{p2} (рис. 5).

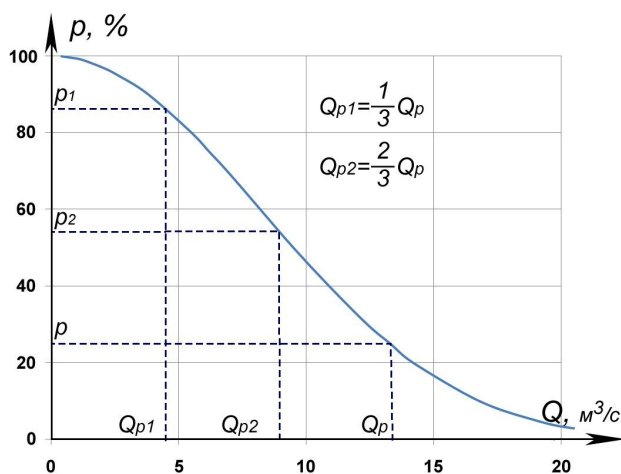


Рис. 5. Позначення розрахункових величин забезпеченості витрат води.

З урахуванням викладеного вище запишемо формули для визначення гідроенергетичного потенціалу ділянки річки наступним чином:

$$N_p = 7,2 \cdot 10^{-3} Q_p H, \text{ МВт, де } Q_p - \text{ м}^3/\text{с}; H - \text{ м}; \quad (9)$$

$$E_p = 2,92 N_p (p + p_1 + p_2), \text{ млн кВт·год/рік.} \quad (10)$$

Результати розрахунків показників гідроенергетичного потенціалу річки Стрий для різних значень забезпеченості витрат води зведені в табл. 2.

Вони засвідчують, що зі зменшенням рівня забезпеченості витрат води спостерігається збільшення розрахункової потужності водотоку. Проте пропорційної залежності між розрахунковою потужністю водотоку і обсягом енергії, що підлягає подальшому перетворенню в електроенергію, не існує. Так, при зміні забезпеченості витрат води від 50% до 25% розрахункова потужність збільшується на 28%, а приріст енергії не перевищує 2,2%.

Отримані кількісні результати для річки Стрий доцільно вважати експертною оцінкою, точність якої може бути підвищена шляхом збільшення пунктів виміру витрат води та застосування цифрових топографічних карт із кращою роздільною здатністю розпізнавання.

Висновки. 1. Розроблено основні положення розрахунку гідроенергетичного потенціалу річкових водотоків для довільних значень рівня забезпеченості стоку з використанням статистичних даних спостережень витрат води та результатів аерокосмічного зондування земної поверхні басейну річки у вигляді цифрової топографічної карти. Визначення імовірнісних оцінок гідрологічних параметрів малих річок реалізовано на основі застосування трипараметричного гамма-розподілу у формі Крицького-Менкеля.

2. Обґрунтовано методику побудови поздовжнього вертикального профілю малої річки шляхом отримання сукупності рельєфу в долині річки в площині, перпендикулярній течії, що дозволяє підвищити точність результатів та зменшити ви-

моги до роздільної здатності цифрової топографічної карти.

3. Застосування цифрових карт потрібної роздільної здатності забезпечує отримання заданої точності результатів техніко-економічних обґрунтувань проектів без проведення затратних польових досліджень спеціалізованими бригадами. Використання україномовної версії загальнодоступного програмного забезпечення світового рівня дозволяє проводити якісні оперативні розрахункові дослідження силами інженерних та експлуатаційних служб відповідних підрозділів наукових, проектних та водогосподарських організацій.

1. *Малинин Н.К.* Теоретические основы гидроэнергетики. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 312 с.

2. *Гидрологические основы гидроэнергетики* / А.Ш. Резниковский, М.А. Великанов, С.Г. Костина и др. – М.:

Энергоатомиздат, 1989. – 260 с.

3. www.pryroda.gov.ua

4. *Гидроэнергетика* / А.Ю.Александровский, М.И.Кнеллер, Д.Н. Коробова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 512 с.

5. *Блохинов Е.Г.* Распределение вероятностей величин речного стока. – М.: Наука, 1974. – 172с.

6. *СНиП 2.01.14-83.* Определение расчетных гидрологических характеристик / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 36 с.

7. *Васько П.Ф., Озорін Д.Ф.* Визначення імовірності величини стоку води малих річок західного регіону України за результатами гідрологічних спостережень // Відновлювана енергетика. – 2010. – № 4. – С. 54–59.

8. *Озорін Д.Ф.* Застосування трипараметричного гама-розподілу у формі Крицького-Менкеля для розрахунку імовірнісних гідрологічних характеристик повені на річках західного регіону України. // Відновлювана енергетика. – 2011. – №2. – С. 62–65.

9. <http://www.google.com/intl/ru/earth/index.html>

КРИМ БУДІНДУСТРІЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

МІЖРЕГІОНАЛЬНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА

- Сучасні будівельні матеріали і технології
- Фарби, лаки
- Будівельні машини і механізми
- Вікна і двері
- Сантехніка
- Екологія, системи очищення води
- Ландшафтна і садово-паркова архітектура
- Системи опалення, вентиляції і кондиціонування
- Енергозбереження та використання нетрадиційних екологічно чистих джерел енергії
- Електротехнічне і освітлювальне обладнання
- Програмне забезпечення підприємств будівельної, енергетичної і електротехнічної галузей промисловості

2012

Осінь

25–27 жовтня

м. Сімферополь
вул. Київська, 115
СК «Дружба»



ФОРУМ

КРЫМСКИЕ
ВЫСТАВКИ

З питань участі у виставці звертайтеся в оргкомітет:
95011, Україна, м. Сімферополь, вул. Самокіша, 18, оф. 406
(0652) 56-06-67, 56-06-47, 54-60-66, 54-67-46
E-mail: expoforum@expoforum.crimea.ua, expo@expoforum.crimea.ua
www.expoforum.crimea.com