

ЕКОЛОГІЯ ГІДРОСФЕРИ

УДК 502.3/.7:556.536:621.22

DOI: 10.31471/2415-3184-2018-2(18)-26-37

В. Г. Сінченко¹, А. М. Николаєв²

¹ДП "Науковий центр превентивної токсикології, харчової та хімічної безпеки імені академіка Л.І. Медведя МОЗ України"
²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНІ РЕСУРСИ ГІРСЬКОЇ РІЧКИ: ПІДХОДИ ДО РОЗРАХУНКУ ВАЛОВОЇ ПОТЕНЦІЙНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВОДЯНОГО ПОТОКУ НА ДІЛЯНЦІ РУСЛА ЗА НАЯВНОСТІ ПРИТОКИ

Рациональний вибір місця розташування МнГЕС або МкГЕС пов'язаний з наявністю інформації про розподіл валової потужності вздовж русла річки. В умовах гірської місцевості при визначенні цієї величини доцільно спиратись на загальні положення принципу поділу профілю русла на ділянки постійного ухилу. Дана робота є дослідженням формування гідроенергетичного потенціалу потоку на ділянці гірської річки. Її метою є встановлення зв'язку між ним та гідрологічними і морфометричними параметрами русла річки.

Вирішена задача знаходження моделі опису процесу нарощування валової потужності під час руху води вниз за течією на ділянці за наявності в її межах притоки річки. Встановлені аналітичні зв'язки між величиною валової потенційної потужності та загальноприйнятими параметрами водного потоку: витратою і профілем русла. За наявності притоки до них додається ще відстань місця розташування гирла притоки від початку ділянки та його ширина. Для опису ухилу ділянки використано лінійне наближення. Обґрунтовано функціональну залежність потужності від витрати потоку, різниці висот русла в межах ділянки, витрати притоки і висотної відмітки її гирла, положення гирла притоки по відношенню до початку ділянки. Встановлені співвідношення, які дають можливість визначення розподілу потужності вздовж ділянки.

Запропонована модель та методика обчислення валової потенційної потужності потоку води на ділянці русла річки для випадку, коли в її межах є наявною притока. В основу методики покладено опис зростання витрати водного потоку в руслі при протіканні води вниз за течією з використанням комбінації лінійної та зворотної тригонометричної функцій.

Розраховано розподіл валової потенційної потужності на ділянці річки Буковинських Карпат – Сірету. Використано співвідношення як точного аналітичного, так і наближеного рішення. Показано практичну тотожність в значеннях потужності потоку, які отримані на їх основі. Обґрунтовано висновок про адекватність отриманого розподілу фізичній моделі приросту потужності вниз за течією, як вище, так і нижче місця входження притоки в русло.

Цінність застосованого підходу до визначення потенційної валової потужності водного потоку на практиці полягає в його евристичній складовій.

Ключові слова: потенційна потужність водного потоку; гідроенергетичний потенціал; мала річка.

Означення проблеми, її актуальність. Відновлення актуальності модернізації раніше діючих і виведених з експлуатації малих гідроелектростанцій (ГЕС) пов'язано з очікуваннями зростання економічного потенціалу держави. В рамках Програми розвитку гідроенергетики України [6] малі ГЕС мають доповнювати раціональне забезпечення енергією окремих територій. Перспективи рекреаційного та туристичного напрямків розвитку територій, зокрема Карпатського регіону, відображені в ряді регіональних програм [5,7], передбачають забезпечення енергією приватних садиб та створених на їх основі підприємств у віддалених від загальних поселень місцях. Для таких випадків економічно доцільним є використання засобів альтернативної енергетики. Енергетичний ресурс малих річок, зокрема перетворений в енергію шляхом створення ГЕС малої потужності, відповідно міні (МнГЕС) та мікро (МкГЕС), дозволяє раціонально

використовувати наявні природно-гідрологічні можливості території з мінімальним втручанням у екологічний стан довкілля.

Раціональний вибір місця розташування МнГЕС або МкГЕС пов'язаний з наявністю інформації про розподіл валової потужності вздовж русла річки. В умовах гірської місцевості при визначенні цієї величини доцільно спиратись на загальні положення принципу поділу профілю русла на ділянки постійного ухилу [15]. Згідно з ним, число ділянок не має бути значним, їх кількість залежить від протяжності річки. Для малих річок в гірській місцевості, як правило, число ділянок вибирається від 6 до 12. При цьому важливою є інформація про параметри потоку води в межах кожної ділянки. Через рельєф місцевості поверхневий стік в ній локалізується з утворенням невеликих потічків та подальшого утворення приток річки. Із сказаного випливає задача знаходження валової потенційної потужності в межах ділянки за наявності руслової притоки, витрата води в якій є співмірною з витратою в основному руслі.

Аналіз попередніх досліджень. Підходи до методики визначення валової потенційної потужності N_p розглядались як з точок зору енергетики, так і гідрології. Узагальнені результати таких досліджень представлені, зокрема в [1, 4]. Для встановлення значення N_p в $\kappaВт$ на ділянці русла з постійним ухилом часто використовують залежність, яка визначена як $N_p = 9,81 \cdot Q \cdot \Delta h \cdot K_{\text{ккв}}$. У цьому співвідношенні Q – витрата води, Δh – різниця висот між верхнім та нижнім рівнями води на ділянці, на якій визначається N_p , а $K_{\text{ккв}}$ – коефіцієнт корисного використання енергії води на гідровузлі. При встановленні цієї залежності використано ряд припущень, зокрема, щодо постійності швидкості потоку води та незмінності поперечного перерізу русла [12]. Співвідношення застосовується при розрахунку потужності малих ГЕС за наявності гребельної компоновки [14]. Також його використано в деяких дослідженнях енергетичного потенціалу річок Карпатського регіону, зокрема, в [2].

При аналізі гідроенергетичних ресурсів використовується і співвідношення, в якому враховується зміна величини водності у річці при русі води вниз за течією. При позначенні витрати на початку досліджуваної ділянки через Q_1 , а в її кінці через Q_n формула для встановлення значення потужності N_p в $\kappaВт$ у цьому випадку має наступний вигляд:

$$N_p = 9,81 \cdot [(Q_1 + Q_n) / 2] \cdot \Delta h \cdot K_{\text{ккв}} . \quad (1)$$

У рівнянні (1) величина $(Q_1 + Q_n) / 2$ визначає середню витрату води, а Δh – перепад висот в межах ділянки. Рівняння (1) може застосовуватись для встановлення значення N_p за умови відсутності в межах ділянки приток. Внесок витрати притоки у загальну потужність при проведенні розрахунків можна оцінити шляхом поділу ділянки на частини до та після входження притоки в основне русло з наступним визначенням потужності для кожної із частин. Загальна потужність ділянки визначатиметься як сума потужностей. Витрата притоки при цьому розглядається як окрема складова. Рівняння (1), з припущенням $K_{\text{ккв}} = 1,0$, застосовувалось рядом авторів, зокрема при дослідженнях гідроенергетичних ресурсів річок Закарпаття [3, 10] та енергетичного потенціалу приток в басейні Середнього Дністра [13].

Невирішені частини проблеми. Адекватність результатів, які можна отримати із застосування зазначених вище співвідношень, залежить від величини стрибків водності в межах ділянки річки. За умов, коли наявні на ділянці притоки мало змінюють водність у основному руслі, розраховане за загальним перепадом висоти значення потужності буде відображати величину наявного енергетичного потенціалу. Коли ж частка водності притоки у загальній водності є значною, розрахована потужність не враховуватиме вплив на неї розподілу водності вздовж ділянки. Встановлення розподілу величини потужності вздовж ділянки шляхом її поділу потребує додаткових громіздких обчислень гідрографічних та гідрологічних параметрів водотоку для кожного із визначених на ділянці місць. Окрім того, встановлене значення потужності в цьому випадку одночасно не забезпечує коректність визначення сумарної потужності в межах перехідної області, де притока входить в основне русло. Причиною є відсутність у зазначених вище рівняннях параметрів перехідної області – її розміру та ширини гирла притоки. Все зазначене ускладнює проведення досліджень щодо визначення ступеню впливу на енергетичний потенціал гірської річки параметрів водного потоку. З цієї причини питання про встановлення аналітичної залежності розподілу величини валової потенційної потужності вздовж ділянки та перспективи можливості аналізу цієї величини при варіації взаємного розташування місця входження притоки в русло та початку ділянки до теперішнього часу є вивченими недостатньо і потребують окремого розгляду.

Мета. Дана робота є дослідженням формування гідроенергетичного потенціалу потоку на ділянці гірської річки. Її метою є встановлення зв'язку між ним та гідрологічними і морфометричними параметрами русла річки. Ставиться задача знаходження моделі опису процесу нарощування валової потужності під час руху води вниз за течією на ділянці за наявності в її межах притоки річки.

Завдання. Поставлена в роботі мета передбачає встановлення аналітичних зв'язків між величиною валової потенційної потужності та загальноприйнятими параметрами водного потоку: витратою і профілем русла. За наявності притоки до них додається ще відстань місця розташування гирла притоки від початку ділянки та його ширина.

Основний матеріал, результати та їх обговорення. Розглянемо ділянку русла річки довжиною L з постійним ухилом. Площу поперечного перерізу потоку води в руслі позначимо через $S(l)$, де l – поточна координата вздовж русла. Припустимо постійність середньої швидкості води в руслі на ділянці v_{cp} , що є можливим при варіації вздовж русла значення $S(l)$. Розділимо ділянку русла на певну кількість n рівних частин і присвоїмо кожній із них відповідний індекс i . Довжина кожної частини визначатиметься величиною $l_i = L/n$. При великій кількості n зміною площі перерізу потоку в межах кожної із частин ділянки S_i можна знехтувати і вважати площу S_i постійною. Тоді енергія потоку E_i , яку він витрачає на переміщення маси води в руслі ріки на довжину l_i за час Δt_i , може бути записана у вигляді: $E_i = S_i \cdot v_{cp} \cdot \rho \cdot l_i \cdot \sin \alpha \cdot (\Delta t_i)$. Тут позначено через ρ густину води, а α – кут нахилу профілю русла на ділянці. З урахуванням зв'язків витрати Q_i та перепаду висоти Δh_i з параметрами русла і потоку можна записати співвідношення $S_i = Q_i / v_{cp}$ та $l_i \cdot \sin \alpha = \Delta h_i$. Тоді енергія потоку E_i може бути визначена як $E_i = Q_i \cdot \rho \cdot \Delta h_i \cdot \Delta t_i$. Через безперервність потоку у річці об'єми води на сусідніх частинах ділянки дотичні між собою і складають увесь потік. Тому загальна величина втрати енергії потоку води на ділянці E_p визначається як сума втрат енергії на всіх частинах ділянки. Просумувавши їх значення, отримаємо для загальної енергії E_p наступне співвідношення: $E_p = \sum Q_i \cdot \rho \cdot \Delta h_i \cdot \Delta t_i$. Сумування проводиться за всіма індексами i від 1 до n . Це рівняння визначає величину енергії, яку витрачає потік води при переміщенні вздовж ділянки на відстань L .

Через постійність значень величин ρ та Δt_i останнє співвідношення для E_p ставить у залежність величину втрати енергії та суму величин добутоків $Q_i \cdot \Delta h_i$. Через те, що значення витрати Q_i при русі потоку, як правило, збільшується, для встановлення значення E_p виникає необхідність визначення закону розподілу витрати Q_i вздовж русла. Одночасно витрату Q_i можна розглядати як функцію висоти окремої частини ділянки. Звернемо увагу, що через постійність ухилу русла всі значення Δh_i є тотожними між собою. Таким чином, в системі ортогональних

координат з осями Q_i і h_i , в межах ділянки сума добутоків $\sum_{i=1}^n Q_i \cdot \Delta h_i$ визначатиме площу

прямокутників з висотою Q_i та шириною Δh_i . Тому, переходячи до зменшення величини Δh_i та розгляду функціональної залежності $Q(h)$ від h та виходячи з геометричної інтерпретації визначення інтегралу, енергію, яка витрачається потоком при проходженні ним русла на ділянці, можна записати у вигляді інтегрального співвідношення $E_p = \rho \cdot \Delta t_i \cdot \int Q(h) dh$. Інтегрування проводиться по зміні висоти в межах ділянки.

Для переходу до потужності розділимо значення E_p на Δt_i та використаємо відомі взаємозв'язки фізичних величин і значення густини води: $1 \text{ кВт} = 102 \text{ кг м}^3/\text{с}$ та $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$. Врахуємо також, що початок ділянки у координатах профілю русла відповідає мінімальному значенню координати по вісі абсцис. В координатах залежності $Q(h)$ від h початок ділянки відповідатиме максимальному значенню висоти, а її кінець – мінімальній висоті. З урахуванням цього валова потенційна потужність потоку води N_p в кВт при визначенні $Q(h)$ в $\text{м}^3/\text{с}$, h – в м, може бути представлена у вигляді рівняння:

$$N_p = 9,81 \cdot \int_{h_n}^{h_1} Q(h) dh . \quad (2)$$

Рівняння (2) є загальним. Воно визначає зв'язок характеристик профілю русла, витрати води в потоці з приростом валової потенційної потужності N_p при проходженні потоку води через ділянку. Рівняння дає можливість знаходження величини N_p шляхом математичного моделювання

процесів формування водності потоку. При цьому може реалізовуватись як аналітичний, так і числовий спосіб знаходження величини значення інтегралу.

Встановимо алгоритм розрахунку величини N_p , виходячи з загальноприйнятої інформації гідрологічного та гідрографічного характеру. Для вирішення поставленої в роботі задачі також необхідно враховувати інформацію про профіль русла і середньорічні витрати води в межах ділянки. Припустимо відомими величину витрати на початку – Q_1 та в кінці – Q_n ділянки, а також значення витрати притоки Q_{np} в місці входження в основне русло. Будемо вважати відомими відстані від витoku річки до початку та кінця ділянки, а також відстань до місця входження притоки. Тоді, позначивши через l_n координату кінця ділянки та через l_{np} – місця входження притоки, розподіл витрати на ділянці можна визначити як:

$$Q(l) = \begin{cases} \frac{Q_n - Q_1 - Q_{np}}{l_n - l_1} l - \frac{Q_n - Q_1 - Q_{np}}{l_n - l_1} l_1 + Q_1 & l_1 \leq l \leq l_{np} \\ \frac{Q_n - Q_1 - Q_{np}}{l_n - l_1} l - \frac{Q_n - Q_1 - Q_{np}}{l_n - l_1} l_1 + Q_1 + Q_{np} & l_{np} < l \leq l_n \end{cases} \quad \text{за умов} \quad (3)$$

Перехід від лінійної на кожній із частин ділянки залежності $Q(l)$ від l в (3) до залежності $Q(h)$ від h можна здійснити, якщо використати апроксимацію залежності висоти профілю русла на досліджуваній ділянці від відстані. Поставимо у відповідність довжинам l_1 , l_n , l_{np} відповідні їм висоти – h_1 , h_n та h_{np} . Для спрощення виду залежностей і запису припустимо суміщення початку вісі вибраних координат вздовж русла l_1 з початком досліджуваної ділянки. За цієї умови, коли $l_1 = 0$, залежність $h(l)$ визначається як:

$$h(l) = \{(h_n - h_1)/l_n\} \cdot l + h_1. \quad (4)$$

В межах лінійного наближення рівняння (4) визначає висоту профілю русла в будь-якій заданій точці розгляду в межах ділянки, місце положення якої визначається довжиною l . Використовуючи (4), визначимо величини l_1 , l_n і l_{np} через h_1 , h_n та h_{np} . Підставивши отримані рівняння в (3) для залежності $Q(h)$ можна записати наступні співвідношення:

$$Q(h) = \begin{cases} [(Q_n - Q_1 - Q_{np})/(h_n - h_1)] \cdot (h - h_1) + Q_1 & h_{np} \leq h \leq h_1 \\ [(Q_n - Q_1 - Q_{np})/(h_n - h_1)] \cdot (h - h_1) + Q_1 + Q_{np} & h_n \leq h < h_{np} \end{cases} \quad \text{за умов} \quad (5)$$

Наведені залежності $Q(l)$ і $Q(h)$ з рівнянь (3) та (5) описують збільшення витрати води в руслі по мірі збільшення відстані між точкою розгляду та початком ділянки. На різних частинах ділянки коефіцієнт нахилу прямої в кожній із залежностей є однаковим. Рівняння відповідають моделі, в якій приріст витрати води в основному руслі річки за рахунок додавання потоку води з притоки зосереджений в точці, місце якої визначено відстанню $l = l_{np}$, або відповідною висотою $h = h_{np}$. В цих точках спостерігається різке збільшення витрати води в руслі річки на величину Q_{np} . В дійсності, потік води притоки надходить в основне русло на короткому відрізку в межах гирла, а стаціонарний режим розповсюдження потоку води спостерігається на значно більших за розмір гирла відстанях. Тому представлена модель недостатньо адекватно описує процес приросту витрати в основному руслі.

Використання співвідношення (5) в алгоритмі встановлення значення потенційної потужності за рівнянням (2) приводить до необхідності роздільного визначення інтегралів на двох частинах ділянки. Перша частина відповідає відстані від початку ділянки до місця входження притоки в русло, друга – від місця входження притоки до кінця ділянки. Відстань l_{np} , та відповідна їй висота h_{np} , найпростіше визначаються за розташуванням геометричного центру гирла притоки. Загальний приріст потужності на ділянці знаходиться як сума значень знайдених таким чином величин. Однак, такий спосіб встановлення величини N_p , коректно відображає лише потужність за межами перехідної області ділянки. В ньому спотворюються результати детальної структури розподілу потужності N_p поблизу місця входження притоки в основне русло. Відповідно до рівняння (2) процес роздільного інтегрування частин функції $Q(h)$ спотворює розподіл стрибка величини потужності, який має спостерігатись в точці $h = h_{np}$. Подібні явища мають місце в інших галузях техніки, коли в моделі для опису процесу використовується функція «різкої межі». Прикладом може служити течія потоку рідини навколо перепони, наявність якої впливає на структуру потоку як до, так і після неї [11].

Відображення стрибка витрати можна здійснити шляхом трансформації співвідношення (3), використавши при цьому комбінацію лінійної і неперервної для всього інтервалу довжин

зворотної тригонометричної функції виду $\arctg(K \cdot l)$. В цьому випадку розподіл витрати потоку води вздовж русла доцільно представити у вигляді:

$$Q(l) = \frac{Q_n - Q_l - Q_{np}}{l_n - l_1} \cdot (l - l_1) + Q_l + \frac{Q_{np}}{2} + \frac{Q_{np}}{\pi} \cdot \arctg [K_{kp} \cdot (l - l_{np})]. \quad (6)$$

Співвідношення (6) є наближенням до (3). У ньому, коефіцієнт крутизни K_{kp} функції приросту витрати водного потоку в дотичній до точки $l = l_{np}$ області русла річки, задає крутизну кривої $Q(l)$. Мінімальне значення цього коефіцієнту можна встановити шляхом розв'язання відносно величини K_{kp} рівняння критерію нарощення енергетичного потенціалу потоку води в межах гирла притоки. Останній представляється як відносна нерівність, яка встановлює взаємозв'язок між максимальною потужністю витрати потоку – $Q_{np} \cdot \rho \cdot a \cdot \sin \alpha$ та потужністю, яка реалізується при вибраному коефіцієнті K_{kp} . З використанням введених вище позначень: ρ – густина води, $2a$ – ширина гирла, δ – задана допустима величина розбіжності зазначених потужностей, нерівність критерію можна записати як:

$$\frac{1}{a} \cdot \left\{ \int_{l_{np}-a}^{l_{np}+a} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \arctg K_{kp} \cdot (l - l_{np}) \right] dl - 2a \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \cdot \arctg (K_{kp} \cdot a) \right] \right\} \geq 1 - \delta. \quad (7)$$

Для оцінювання за нерівністю (7) величини K_{kp} необхідна інформація про ширину гирла притоки. Для малої річки найбільш точний спосіб її отримання – пряме вимірювання. Доступним шляхом є і встановлення ширини гирла методами ГІС-технології позиціонування. Результати оцінки величини K_{kp} , наприклад для $\delta=0,01$ та гирла розміром $2a=10$ м, дають величину $K_{kp}=12,74$ м⁻¹. При $\delta=0,005$ значення K_{kp} збільшується до 25,47 м⁻¹. Зменшення розміру гирла до 5 м збільшує для зазначених δ значення K_{kp} відповідно до 25,47 і 50,94 м⁻¹.

Аналітичне дослідження розподілу потужності, зокрема і в місці входження притоки у основне русло, можна здійснити, якщо трансформувати рівняння (6), використавши наведену вище залежність висоти точки h від її лінійної координати l з рівняння (4). Тоді розподіл витрати потоку води як функції висоти може бути представлений наступним чином:

$$Q(h) = \frac{Q_n - Q_l - Q_{np}}{h_n - h_1} \cdot (h - h_n) + Q_n - \frac{Q_{np}}{2} + \frac{Q_{np}}{\pi} \cdot \arctg [{}^h K_{kp} \cdot (h - h_{np})]. \quad (8)$$

В цьому рівнянні величина ${}^h K_{kp} = K_{kp} \cdot (l_n / (h_n - h_1))$ – коефіцієнт крутизни по змінній h . Він визначає наскільки круто функція $\arctg [{}^h K_{kp} \cdot (h - h_{np})]$ переходить від асимптотичного значення – $\pi/2$ до значення $+\pi/2$ в точці $h = h_{np}$. Використання такого представлення функції зміни розподілу витрати потоку з висотою русла забезпечує аналітичне обчислення інтегралу в рівнянні (2). Дійсно, при підстановці функції $Q(h)$ в (2) отримуємо суму з п'яти інтегралів, чотири з яких є інтегралами від елементарних функцій. Після їх обчислення можна записати:

$$N_p = 9,81 \cdot \left[\frac{Q_n + Q_l}{2} \cdot (h_1 - h_n) + \frac{Q_{np}}{\pi} \cdot \int_{h_n}^{h_1} \arctg [{}^h K_{kp} \cdot (h - h_{np})] dh \right]. \quad (9)$$

У співвідношенні (9) перший доданок з множником 9,81 тотожно дорівнює зазвичай використовуюваному рівнянню (1). В той же час, структура співвідношення (9) показує, що за наявності притоки річки оцінювання величини потенційної потужності N_p з використанням лише даних про витрату на початку ділянки та в її кінці призводить до завищення результату оцінки. Точнішу оцінку можна отримати шляхом визначення значення другого доданку в рівнянні (9). Інтеграл у цьому доданку може бути обчислений за допомогою загальновідомих таблиць інтегралів. З урахуванням його аналітичного представлення, співвідношення для розрахунку величини валової потенційної потужності визначатиметься наступним рівнянням:

$$N_p = 9,81 \cdot \left\{ \frac{Q_n + Q_l}{2} \cdot (h_1 - h_n) + \frac{Q_{np}}{\pi} \cdot (h_1 - h_{np}) \cdot \arctg [{}^h K_{kp} \cdot (h_1 - h_{np})] - \frac{Q_{np}}{\pi} \cdot (h_n - h_{np}) \cdot \arctg [{}^h K_{kp} \cdot (h_n - h_{np})] + \frac{Q_{np}}{2\pi \cdot {}^h K_{kp}} \cdot \ln \frac{1 + [{}^h K_{kp} \cdot (h_n - h_{np})]^2}{1 + [{}^h K_{kp} \cdot (h_1 - h_{np})]^2} \right\}. \quad (10)$$

Співвідношення (10) є загальним рішенням. Через параметри висоти гирла притоки h_{np} та її витрату Q_{np} воно визначає залежність потужності в кінці ділянки від відстані між місцем розташування гирла притоки та початком ділянки. Для скорочення запису позначимо величину

$\frac{1+[{}^h K_{kp} \cdot (h_n - h_{np})]^2}{1+[{}^h K_{kp} \cdot (h_1 - h_{np})]^2}$ та її частини – $[{}^h K_{kp} \cdot (h_1 - h_{np})]$ і $[{}^h K_{kp} \cdot (h_n - h_{np})]$ відповідно через

$H_4({}^h K_{kp}, h_1, h_n, h_{np})$, ${}^{kp} H_1^{np}$ та ${}^{kp} H_n^{np}$. За умови $h_1 - h_{np} = -(h_n - h_{np})$, тобто коли притока входить в русло посередині ділянки, значення в рівнянні (10) четвертого доданку тотожно дорівнює нулю. Одночасно другий і третій доданки рівняння (10) компенсують один одного. За такого розташування гирла, незалежно від величини витрати Q_{np} , розрахунок величини потужності N_p з використанням співвідношення (10) визначить результат, який тотожно співпадатиме з обчисленим за наведеним вище рівнянням (1). Відмінності між розрахованими величинами спостерігатимуться, якщо місце розташування гирла притоки буде зміщене в бік початку, або кінця ділянки. У цьому випадку використання співвідношення (10) може давати значення потужності, як менше, так і більше за те, яке визначається за формулою (1). Відхилення між значеннями в цих двох випадках розрахунку визначатиметься як величиною витрати притоки, так і відстанню, яку водний потік з гирла проходить до кінця ділянки.

Визначимо розподіл валової потужності вздовж ділянки. Для цього висоту кінця ділянки h_n розглянемо як змінну величину, межі зміни якої становлять від h_1 до h_n . Позначимо цю змінну через \hat{h}_n . Нове місце розташування гідрогенератора вздовж русла зафіксуємо через довжину \hat{l}_n . Використаємо рівняння (4) і поставимо у відповідність \hat{l}_n висоту \hat{h}_n . Встановимо для цієї висоти нове значення витрати $\hat{Q}_n(\hat{h}_n)$. Для цього використаємо рівняння вісі коридору зміни функцій $(Q_{np}/\pi) \cdot (h_1 - h_{np}) \cdot \arctg[{}^{kp} H_1^{np}]$ і $(Q_{np}/\pi) \cdot (h_n - h_{np}) \cdot \arctg[{}^{kp} H_n^{np}]$ у співвідношенні (10). Представлення аналітичного виду вісі коридору є наступним:

$$Q(h) = [(Q_n - Q_{np} - Q_1)/(h_n - h_1)] \cdot (h - h_n) + Q_n - Q_{np} / 2. \quad (11)$$

Співвідношення (11) доцільно використати для розрахунку значення добутку суми витрат та різниці висот $h_1 - h_n$ потоку в першому доданку рівняння (10). Діапазон висоти \hat{h}_n при цьому може змінюватись від h_1 до h_n . Підставимо в (10) замість Q_n значення витрати, яке розраховане для точки на вісі коридору, висота якої \hat{h}_n , а Q_1 поміняємо на $Q_1 + (Q_{np}/2)$. Замінімо також в функціях $H_4({}^h K_{kp}, h_1, h_n, h_{np})$, і ${}^{kp} H_n^{np}$ величину h_n на \hat{h}_n . Тоді, ввівши позначення ${}^{kp} \hat{H}_n^{np} = {}^h K_{kp} \cdot (\hat{h}_n - h_{np})$, $\hat{H}_4({}^h K_{kp}, h_1, \hat{h}_n, h_{np}) = \frac{1+[{}^{kp} \hat{H}_n^{np}]^2}{1+[{}^{kp} H_1^{np}]^2}$ та $\text{tg}(\beta) = \frac{Q_n - Q_1 - Q_{np}}{h_n - h_1}$, де β – кут нахилу визначеної рівнянням (11) вісі до вісі абсциси h , отримаємо загальне рівняння для розрахунку потенційної потужності $N_p(\hat{h}_n)$ в точці \hat{h}_n . Його аналітичний запис є таким:

$$N_p(\hat{h}_n) = 9,81 \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot [\text{tg}(\beta) \cdot (\hat{h}_n - h_n) + Q_n + Q_1] \cdot (h_1 - \hat{h}_n) + \frac{Q_{np}}{\pi} \cdot (h_1 - h_{np}) \cdot \arctg[{}^{kp} H_1^{np}] - \right. \\ \left. - \frac{Q_{np}}{\pi} \cdot (\hat{h}_n - h_{np}) \cdot \arctg[{}^{kp} \hat{H}_n^{np}] + \frac{Q_{np}}{2\pi \cdot {}^h K_{kp}} \cdot \ln(\hat{H}_4({}^h K_{kp}, h_1, \hat{h}_n, h_{np})) \right\}. \quad (12)$$

Запропонований нами алгоритм та наведені розрахункові співвідношення отримані в процесі визначення потужності в рамках лінійного моделювання. Тому вони є наближеними до реалій. Однак, шляхом варіації висоти як параметра, їх використання робить можливим встановлення розподілу потужності вздовж ділянки. На відміну від рівняння (10), коли при встановленні такого розподілу необхідно попередньо визначати висоту і витрату для кожного із місць розміщення гідрогенератора, рівняння (12) є об'єднуючим. У ньому поєднані значення потужності потоку, його витрата, відмітки висот на вході і виході ділянки, витрата, ширина та відмітка висоти гирла притоки, а також поточна відмітка висоти місця розміщення гідрогенератора. До вказаних параметрів додається і значення коефіцієнту крутизни, яке встановлюється на основі рівняння (7) за даними про довжину і перепад висоти на ділянці.

Оцінімо вплив останнього доданку рівняння (12) в кінцеве значення величини потужності в точці, висота якої визначена як \hat{h}_n . Порівняємо його з впливом другого та третього доданків.

Розглянемо спочатку точку, яка відповідає умові $\hat{h}_n = h_{np}$. У цьому випадку $\ln(\hat{H}_4({}^h K_{kp}, h_l, \hat{h}_n, h_{np})) = -\ln(1 + [{}^{kp} H_1^{np}]^2)$. Максимальне абсолютне значення цієї функції буде спостерігатись, якщо h_{np} є мінімальним. В той же час, через наявність множника $Q_{np}/(2\pi^h K_{kp})$, вплив розглянутого доданку на кінцевий результат в точці $\hat{h}_n = h_{np}$ є суттєво меншим аніж вплив другого доданку, величина якого наближається до $-(Q_{np}/2) \cdot (h_l - h_{np})$.

Найбільші значення функції $\ln(\hat{H}_4({}^h K_{kp}, h_l, \hat{h}_n, h_{np}))$ спостерігатимуться за виконанням умови $h_{np} = h_l$, тобто коли притока входить у основне русло на початку ділянки. Кількісно цей випадок демонструє розрахунок значень функції $\ln(\hat{H}_4({}^h K_{kp}, h_l, \hat{h}_n, h_{np}))$ і величини четвертого доданку при варіації значень \hat{h}_n . В таблиці 1, з точністю до множників 9,81 і Q_{np} , наведені його результати. Вони отримані для типових в реальних умовах величин початкового перепаду висоти $(h_l - \hat{h}_n)$ в 40 м та коефіцієнту ${}^h K_{kp} = -200 \text{ м}^{-1}$. Висота h_l прийнята в 380 м. Початкова різниця висот $(\hat{h}_n - h_{np})$ вибрані як -0,1 та -0,5 м. При ухилі ділянки 0,02 друге значення відповідає половині різниці від 5-ти кратної ширини гирла розміром $2a = 10$ м. При тих же висотах, для порівняння, в табл. 1 наведена і величина $\pi^{-1} \cdot (\hat{h}_n - h_{np}) \cdot \arctg[{}^{kp} \hat{H}_1^{np}]$. Наведено у відсотках також відносне значення χ – відношення двох обчислених функцій.

Таблиця 1

Значення третього та четвертого доданків співвідношення (12) для різної висоти за умов наведених типових параметрів русла та розміщення гирла притоки на початку ділянки

$\hat{h}_n, \text{ м}$	$\hat{h}_n - h_{np}, \text{ м}$	$\ln(1 + [{}^{kp} \hat{H}_1^{np}]^2)$, безрозмірна одиниця	$(2\pi^h K_{kp})^{-1} \cdot$ $\ln(1 + [{}^{kp} \hat{H}_1^{np}]^2)$, м	$\pi^{-1} \cdot (\hat{h}_n - h_{np}) \cdot$ $\arctg[{}^{kp} \hat{H}_1^{np}]$, м	Відносне значення χ , %
379,9	-0,1	5,99396	$-4,76984 \cdot 10^{-3}$	-0,048410	9,853006
379,5	-0,5	9,21044	$-7,32944 \cdot 10^{-3}$	-0,248408	2,950558
379,0	-1	10,59666	$-8,4326 \cdot 10^{-3}$	-0,498408	1,691907
378,0	-2	11,98293	$-9,5357 \cdot 10^{-3}$	-0,998408	0,955090
376,0	-4	13,36922	$-1,06389 \cdot 10^{-2}$	-1,998408	0,532369
370,0	-10	15,20180	$-1,20972 \cdot 10^{-2}$	-4,998408	0,242021
365,0	-15	16,01273	$-1,27425 \cdot 10^{-2}$	-7,498408	0,169936
360,0	-20	16,58810	$-1,32004 \cdot 10^{-2}$	-9,998408	0,132025
350,0	-30	17,39903	$-1,38457 \cdot 10^{-2}$	-14,998408	0,092314
340,0	-40	17,97439	$-1,43036 \cdot 10^{-2}$	-19,998408	0,071523

Дані табл. 1 вказують на збільшення абсолютного значення четвертого доданку при зменшенні висоти \hat{h}_n , тобто при зміщенні гідрогенератора в кінець ділянки. Однак в цьому випадку збільшується величина третього доданку. Відношення ж зазначених доданків зменшується. Внесок четвертого доданку в загальну потужність є незначним в порівнянні з внеском другого чи третього, якщо не розглядати місця в руслі поблизу гирла притоки. Розрахунки свідчать, що поза зоною розміром ± 5 – ти кратної половини ширини гирла від місця входження притоки в русло внеском четвертого доданку рівняння (12) можна знехтувати. За зазначених вище параметрів русла, встановлення в межах ділянки величини валової потенційної потужності може бути проведено з точністю, яка є вищою за 3 відсотки.

Розглянемо задачу встановлення розподілу потужності в межах ділянки, виключивши з неї область поблизу місця входження притоки в основне русло. Таке обмеження на відстань \hat{l}_n дозволяє спростити рівняння (12). Дійсно, виділимо таку область, зафіксувавши її через дві висоти ${}^{dn} h_{np}$ і ${}^{up} h_{np}$, які розташовані нижче та вище висоти гирла. За рівнянням (4) зазначені висоти можна визначити як ${}^{dn} h_{np} = \{(h_n - h_l)/l_n\} \cdot (l_{np} + 5a) + h_l$ – зменшену, а ${}^{up} h_{np} = \{(h_n - h_l)/l_n\} \cdot (l_{np} - 5a) + h_l$ – збільшену висоту від висоти центру гирла. Зменшення та збільшення вибрано на величину 5-ти кратної зміни, яка відповідає перепаду висоти на половині розміру гирла. Тоді, розглядаючи інтервал \hat{h}_n в межах $h_n \leq \hat{h}_n < {}^{dn} h_{np}$, величина $\arctg[{}^{kp} H_1^{np}]$ дорівнюватиме $(-\pi/2)$, а $\arctg[{}^{kp} \hat{H}_1^{np}]$ –

($\pi/2$). Підставляючи ці значення в рівняння (12) та опустивши четвертий доданок, отримаємо для наближеного значення потужності $\tilde{N}_p(\hat{h}_n)$:

$$\tilde{N}_p(\hat{h}_n) = 9,81 \cdot \{0,5 \cdot [\operatorname{tg}(\beta) \cdot (\hat{h}_n - h_n) + Q_n + Q_1 - Q_{np}] \cdot (h_1 - \hat{h}_n) + Q_{np} \cdot (h_{np} - \hat{h}_n)\}. \quad (13)$$

Розглянемо співвідношення для розрахунку потужності, коли зміна висоти точки розміщення гідрогенератора передбачається в межах ${}^{up}h_{np} < \hat{h}_n \leq h_1$. Тоді, за зазначених вище обмежень, значення функцій $\arctg [{}^{kp}H_1^{np}]$ і $\arctg [{}^{kp}\hat{H}_n^{np}]$ дорівнюватимуть ($-\pi/2$). Як і у попередньому випадку, опускаючи через незначний внесок четвертий доданок, трансформуємо рівняння (12) у наступне співвідношення:

$$\tilde{N}_p(\hat{h}_n) = 9,81 \cdot \{0,5 \cdot [\operatorname{tg}(\beta) \cdot (\hat{h}_n - h_n) + Q_n + Q_1 - Q_{np}] \cdot (h_1 - \hat{h}_n)\}. \quad (14)$$

З останнього рівняння видно, що в частині ділянки від її початку до місця входження притоки в русло витрата для розрахунку потужності визначається як середнє значення між витратою Q_1 та витратою в точці \hat{h}_n . Остання залежить від витрати притоки Q_{np} лише через коефіцієнт нахилу $\operatorname{tg}(\beta)$ у виразі для знаходження витрати в точці, висота якої \hat{h}_n . Через тотожність коефіцієнту у рівняннях (13) і (14) витрата і валова потужність на цій частині ділянки залежать лише від різниці висот ($h_1 - \hat{h}_n$). Таким чином, рівняння (14) за своєю структурою подібне до рівняння (1). В той же час, рівняння (13) через наявність множника $Q_{np} \cdot (h_{np} - \hat{h}_n)$, враховує додаткову потужність, яка утворюється завдяки проходженню потоку притоки частиною ділянки за місцем її входження в русло річки.

Одним з можливих варіантів апробації рівнянь (12), (13) і (14) є проведення розрахунків з використанням гідрографічних характеристик та гідрологічних параметрів реальної річки. Для спрощення процесу визначення витрати потоку в руслі доцільно розглядати ділянки річки, які розташовані в передгірських районах, де ухил русла є незначним. У цьому випадку з певним наближенням можна вважати, що величина витрати потоку буде залежати від площі басейну поверхневого стоку річки значно більше, аніж від його середньої висоти. Тому, видається коректним, для розрахунку витрати потоку вниз за течією, при незначній відстані від гідрологічного пункту спостереження, використовувати лінійну екстраполяцію по зміні площі басейну. Таким чином можна уникнути громіздкого та затратного способу визначення витрати потоку на ділянці через розрахунок середніх висот басейну та визначення модуля стоку для території розташування ділянки річки.

Наближеною до зазначених вимог може вважатись ділянка русла р. Сірет, виток якої розташовується на висоті 933 м в Буковинських Карпатах. В кінці української частині русла, в передгір'ї Карпат, в р. Сірет впадає притока – р. Малий Сірет (р. Мал. Сірет). Вниз та вверх за течією від місця входження р. Мал. Сірет в основне русло визначена ділянка, параметри якої є: розташування по руслу – 79–92 км від витoku, ухил ділянки – 1,58‰. З урахуванням картографічної інформації (карта масштабу 1:75 000, видавництво «Картографія», 2010 р.) розрахована висота початку ділянки становила 332,134 м, в її кінця – 311,594 м. Витрата води на початку, в кінці та в місці входження притоки розраховувалась з використанням лінійної екстраполяції на основі даних про площу басейну річки [9]. При цьому використано інформацію про водність у пунктах спостереження Гідрометеослужби України на р. Сірет в с. Лопушна та м. Сторожинець [8]. Згідно проведених розрахунків середньорічна витрата на початку ділянки склала 6,37 м³/с, в місці входження притоки – 6,76 м³/с. В кінці ділянки, з урахуванням витрати р. Мал. Сірет, значення витрати збільшується до величини 11,26 м³/с.

Притока, р. Мал. Сірет, впадає в русло р. Сірет на 86 км від витoku, за 5,7 км від кінця ділянки. Висота місця входження притоки – 320,60 м. Параметри витрати р. Мал. Сірет визначені, як і в попередньому випадку, за результатами вимірювання витрати у пункті спостереження Гідрометеослужби України в с. Верхні Петрівці. З урахуванням співвідношення площ басейну поверхневого стоку до пункту спостереження та до місця входження р. Мал. Сірет в русло р. Сірет витрата р. Мал. Сірет становила 4,19 м³/с. За даними гідрографічних описів попередніх років орієнтовна величина ширини гирла в місці входження коливається від 9 до 11 м. За уточненими даними станом на 04 лютого 2017 р, які отримані за допомогою технології глобальної

інформаційної системи Google Image, кінцеве значення ширини гирла р. Мал. Сірет визначено як $2a = 11,8$ м.

Наведені вище дані дозволяють здійснити розрахунок проміжних параметрів та розподілу потужності вздовж визначеної ділянки. В таблиці 2 наведені його результати.

Таблиця 2

Значення проміжних параметрів і потужностей $N_p(\hat{h}_n)$, $\tilde{N}_p(\hat{h}_n)$ та їх різниці $\Delta N_p(\hat{h}_n)$ при різних висотах \hat{h}_n і відстанях \hat{l}_n в межах ділянки русла р. Сірет за 7,3 км до та 5,7 км після входження притоки – р. Малий Сірет

\hat{l}_n , м	\hat{h}_n , м	$h_l -$ \hat{h}_n , м	$h_{np} - \hat{h}_n$, м	$(Q_{np}/(2\pi^h K_{kp})) \cdot$ $\ln(\hat{H}_4({}^h K_{kp}, h_l, \hat{h}_n, h_{np})), \text{кВт}$	$N_p(\hat{h}_n)$, кВт	$\tilde{N}_p(\hat{h}_n)$, кВт	$\Delta N_p(\hat{h}_n)$ $\cdot 1000, \text{кВт}$
0	332,134	0,000	-11,534	0,000	0,000	0,000	0
4000	325,814	6,320	-5,2140	$1,549153 \cdot 10^{-4}$	401,613	401,612	1
6500	321,864	10,270	-1,2640	$4,314122 \cdot 10^{-4}$	659,404	659,400	4
7100	320,916	11,218	-0,3160	$7,019050 \cdot 10^{-4}$	722,052	722,046	8
7200	320,758	11,376	-0,1580	$8,371513 \cdot 10^{-4}$	732,524	732,516	8
7250	320,679	11,455	-0,0790	$9,723975 \cdot 10^{-4}$	737,763	737,754	9
7275	320,639	11,494	-0,0395	$1,107643 \cdot 10^{-3}$	740,385	740,374	11
7290	320,616	11,518	-0,0158	$1,286422 \cdot 10^{-3}$	741,959	741,946	13
7295	320,608	11,526	-0,0079	$1,421643 \cdot 10^{-3}$	742,484	742,470	14
7298	320,603	11,531	-0,0032	$1,600254 \cdot 10^{-3}$	742,800	742,784	16
7300	320,600	11,534	0,0000	$2,200003 \cdot 10^{-3}$	743,018	742,994	24
7302	320,597	11,537	0,0032	$1,600254 \cdot 10^{-3}$	743,349	743,334	15
7305	320,592	11,542	0,0079	$1,421643 \cdot 10^{-3}$	743,857	743,843	14
7310	320,584	11,550	0,0158	$1,286422 \cdot 10^{-3}$	744,705	744,692	13
7325	320,560	11,573	0,0395	$1,107643 \cdot 10^{-3}$	747,250	747,239	11
7350	320,521	11,613	0,0790	$9,723975 \cdot 10^{-4}$	751,493	751,484	9
7400	320,442	11,692	0,1580	$8,371513 \cdot 10^{-4}$	759,984	759,975	9
7700	319,968	12,166	0,6320	$5,666586 \cdot 10^{-4}$	810,975	810,969	6
8200	319,178	12,956	1,4220	$4,084305 \cdot 10^{-4}$	896,130	896,126	4
9000	317,914	14,220	2,6860	$2,843368 \cdot 10^{-4}$	1032,813	1032,810	3
13000	311,594	20,540	9,0060	$4,827411 \cdot 10^{-5}$	1724,245	1724,244	1

Наведені в табл. 2 дані відповідають очікуваному результату. Згідно з ними, поза межами перехідної області розміром $\pm 5a$, значення потужності $\tilde{N}_p(\hat{h}_n)$, які розраховані за рівняннями (13) і (14), є практично тотожними значенням потужності $N_p(\hat{h}_n)$. Їх відносна різниця $\Delta N_p(\hat{h}_n)/N_p(\hat{h}_n) = (N_p(\hat{h}_n) - \tilde{N}_p(\hat{h}_n))/N_p(\hat{h}_n)$ через малий ухил русла на ділянці є меншою за 0,00148 відсотка. Величина ухилу, сумісно з шириною гирла притоки, через рівняння (7) визначає значення коефіцієнту K_{kp} . В межах перехідної області $\pm 5a$, з ростом \hat{l}_n відношення $\Delta N_p(\hat{h}_n)/N_p(\hat{h}_n)$ починає поступово збільшуватися і досягає максимуму при $\hat{l}_n = l_{np}$. При подальшому зростанні відстані \hat{l}_n відносна різниця потужностей поступово стає меншою, наближаючись до зазначеної величини 0,00148 відсотка на межі перехідної області.

Інформативно значимим параметром є приріст потужності по довжині русла, або питома потужність ${}^p N_p$. Її величина в сукупності із значенням валової потужності визначає місця вздовж русла на ділянці малої річки, які є потенційно придатними для ефективної роботи гідрогенератора МнГЕС або МкГЕС. Визначається питома потужність як ${}^p N_p = (N_p(\hat{h}_n) - N_p(\hat{h}_{n-1})) / (\hat{l}_n - \hat{l}_{n-1})$. Величина ${}^p N_p$ є функцією \hat{l}_n через залежність, згідно рівняння (4), \hat{h}_n від \hat{l}_n . З фізичних міркувань зрозуміло, що після входження потоку води притоки в основне русло питома потужність має збільшитись у порівнянні із значенням ${}^p N_p$ на частині ділянки до входження притоки. Дані табл. 2 відповідають такому твердженню. Так, якщо величину $\hat{l}_n - \hat{l}_{n-1}$ на частині ділянки визначити як довжину від початку ділянки до початку перехідної області, тобто у 7270,5 м, то на цій частині ділянки значення ${}^p N_p$ становитиме 101,77 кВт/км. В частині ділянки після входження притоки, від перехідної області до кінця ділянки, значення величини ${}^p N_p$ буде дорівнювати 172,16 кВт/км.

Безпосередньо в центрі перехідної області, коли $\hat{I}_n = I_{np}$, питома потужність pN_p становитиме 137,19 кВт/км. Це значення визначене як середнє з двох величин pN_p , які відповідають інтервалу $\hat{I}_n - \hat{I}_{n-1} = \pm 1$ м. Остання величина pN_p свідчить про те, що в межах дослідженої ділянки р. Сірет процес більш стрімкого зростання потужності в другій частині ділянки починається з гирла притоки. Причиною такого зростання є поступове збільшення в руслі р. Сірет величини витрати водного потоку з 6,76 до 10,95 м³/с при його переміщенні повз межі гирла р. Мал. Сірет.

Висновки. Викладені вище результати роботи дозволяють сформулювати наступні положення, які резюмують проведені дослідження:

1. Запропонована модель та методика обчислення валової потенційної потужності потоку води на ділянці русла річки для випадку, коли в її межах є наявною притока. В основу методики покладено опис зростання витрати водного потоку в руслі при протіканні води вниз за течією з використанням комбінації лінійної та зворотної тригонометричної функцій. З використанням даних гідрологічної та гідрографічної інформації отримано ряд розрахункових співвідношень. Вони поєднують значення валової потенційної потужності потоку в довільній точці ділянки з величиною витрат води на початку та в кінці ділянки, витратою води в гирлі притоки. Крім того, параметрами співвідношень виступають ширина гирла та координати місця входження притоки в основне русло, а також перепад висоти в руслі на визначеній ділянці та її довжина.

2. На основі отриманих співвідношень представлені результати розрахунку потужності потоку води на рівнинній ділянці русла гірської річки Буковинських Карпат – р. Сірет. Вони адекватно відображають суть фізичного процесу збільшення гідроенергетичного потенціалу потоку при переміщенні місця розташування гідрогенератора вниз за течією. При цьому забезпечується отримання значень розподілу величини потужності водного потоку на ділянці постійного ухилу в точках як до місця входження притоки в основне русло, так і після нього. В різних частинах ділянки, поза межами перехідної області, де притока входить в основне русло, отримані за приведеними в роботі рівняннями значення потужності є достатньо близькими за величиною значенням, які можуть бути встановлені традиційними методами. В межах перехідної області у величині потужності для такого випадку розрахунку спостерігатиметься розходження. Однією з його причин є неврахування при розрахунку потужності за традиційними рівняннями розподілу витрати води в межах гирла притоки.

3. Цінність застосованого підходу до визначення потенційної валової потужності водного потоку на практиці полягає, зокрема, в його евристичній складовій. Використана модель та встановлені співвідношення створюють передумови для детального дослідження впливу на кінцеве значення величини потужності ряду параметрів потоку і гідрографічних характеристик річки. Перспективою продовження представленого дослідження є визначення гідроенергетичного потенціалу при різних варіантах розташування притоки в межах ділянки та варіації гідрографічних і гідрологічних параметрів. Практичний інтерес також становить і дослідження впливу приток у верхній частині гірської річки на величину потужності, який, зазвичай, враховується інтегрально. Результати роботи спрямовані на оцінку можливостей використання гідроенергетичних пристроїв у малоосвоєній гірській місцевості.

Література

- 1 Арсеньев Г.С., Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты / Г.С. Арсеньев, А.Г. Иваненко. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 272 с.
- 2 Архипова Л.М. Природно-техногенна безпека гідроекосистем: монографія. – Івано-Франківськ: Видавництво ІФНТУНГ, 2011. – 366 с.
- 3 Кравченко Т. Визначення гідроенергетичного потенціалу малих річок (на прикладі річки Слобода) / Т. Кравченко // Науковий вісник Чернівецького ун –ту: Зб.наук. праць. Чернівці: Чернівецький нац. ун. – т , 2003, Вип. 167, Географія. – С. 102 – 106.
- 4 Михайлов Л.П. и др. Малая гидроэнергетика / Под ред. Л. П. Михайлова. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.
- 5 Про комплексну регіональну цільову програму розвитку туризму в області на 2016-2020 роки. Затверджена рішенням XXXIX сесії VI скликання Івано-Франківської обласної ради за № 1820 – 39/2015. – [чинна від 27.10.2015].
- 6 Програма розвитку гідроенергетики держави Україна до 2026 року. [Електронний ресурс]: Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України 13. 07. 2016 р. за № 552-р / Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/552-2016-%D1%80>

7 Програма розвитку туризму в Чернівецькій області на 2016–2020 роки, затверджена рішенням IV сесії VII скликання Чернівецької обласної ради за № 20 – 4/16. – [чинна від 15.03.2016].

8 Ресурсы поверхностных вод СССР. Украина и Молдавия // Под ред. М.С. Каганера. – Л.: Гидрометеиздат, 1969, Т. 6, Вып. 1. – 884 с.

9 Ресурсы поверхностных вод СССР. Украина и Молдавия // Под ред. М.С. Каганера. – Л.: Гидрометеиздат, 1978, Т. 7, Вып. 1. – 490 с.

10 Сиротюк М.І. Відновні енергетичні ресурси Закарпатської області: оцінка потенціалу та проблеми використання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. географ. наук: спец.: 11.00.11 – «Конструктивна географія та раціональне використання природних ресурсів» / М.І. Сиротюк. – Львів, 1997. – 23 с.

11 Смыслов В.В. Гидравлика и аэродинамика : Учебник для вузов . – Пер. с укр., перер. и доп. – Киев: Вища школа. Головное издательство, 1979. – 336 с.

12 Субботин А.С. Основы гидротехники: Уч. – е пособие. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 320 с.

13 Цепенда М.В. Гідроенергетичний потенціал річок басейну Середнього Придністров'я / М.В. Цепенда, М.М. Цепенда // Науковий вісник Чернівецького ун –ту: Зб. наук. праць. Чернівці: Чернівецький нац. ун.-т, 2015. – Вип. 762 – 763, Географія, С. 72 – 78.

14 Чеботарев В.И. Гидрологические и водноэнергетические расчёты сельских ГЭС. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1958. – 444 с.

15 Энергетические ресурсы СССР. Гидроэнергетические ресурсы / А.Б.Авакян, В.А.Баранов, Л.Б.Бернштейн и др. // Под ред. А.Н. Вознесенского. – М.: Наука, 1967. – 600 с.

Надійшла до редакції 14 листопада 2018 р.

V. H. Sinchenko¹, A. M. Nykolaiev²

¹ State enterprise “Academician Medved Scientific Center for Preventive Toxicology, Food and Drug Chemical Safety of the Ministry of Health of Ukraine”

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

WATER- POWER RESOURCES OF A MOUNTAIN RIVER: APPROACHES TO THE CALCULATION OF GROSS POTENTIAL WATER FLOW CAPACITY AT THE SECTION OF A BED WITH AN INFLOW AVAILABLE

Rational choice of the location of the water-electro power stations is associated with the availability of information on the distribution of gross power along the river bed. In mountainous conditions, while determining this value, it is advisable to rely on the general principles of the division of the profile of the river bed into the sections of constant slope. This work is the study of the formation of the hydropower potential of the stream in the area of the mountain river. Its purpose is to establish a connection between the hydropower potential and the hydrological as well as morphometric parameters of the river bed.

The article solves the task of finding a model for describing the process of gross power increase during the downstream water flow at the section with the inflow available. The analytical relations between the gross potential power value and the generally accepted parameters of the water flow (flow volume and bed profile) are established. With an inflow available, the distance between the location of the inflow mouth and the beginning of the section as well as inflow width are also taken into consideration. A linear approximation is used to describe the slope of a section. The functional dependence of power on the flow volume, on the difference in the heights of the bed within the section, on inflow volume and on the height mark of its mouth, on the position of the inflow mouth relative to the beginning of the section is substantiated. The article establishes the correlations that give the possibility to determine of the power distribution along the section.

The authors suggest the model and the method of calculating the gross potential power of the water flow on the section of the river bed for a case when the inflow is available. The basis of the

methodology is the description of the flow volume growth in the bed downstream the river. This description is combined with linear and reverse trigonometric functions.

The distribution of gross potential capacity at the section of the Bukovyna Carpathians – the Siret River is calculated. The correlation of both exact analytical and approximate solutions is used. The paper shows the practical identity in the values of the power of the flow, obtained on their basis. The authors made a conclusion about the adequacy of the received distribution of the physical model of downstream power increase, both above and below the inflow entry point.

The practical value of the approach to determining the potential gross flow capacity of water lies in its heuristic component.

Key words: potential water flow; hydropower potential; small river.

References

- 1 Arsen'yev G.S., Vodnoye khozyaystvo i vodokhozyaystvennyye raschety / S. Arsen'ev, A. Ivanenko. - SPb.: Gidrometeoizdat, 1993. - 272 s.
- 2 Arkhypova L.M. Pryrodno-tekhohenna bezpeka hidroekosystem: monohrafiya. – Ivano-Frankivs'k: Vydavnytstvo IFNTUNH, 2011. – 366 s.
- 3 Kravchenko T. Vyznachennya hidroenerhetychnoho potentsialu malykh richok (na prykladi richky Sloboda) / T. Kravchenko // Naukovyy visnyk Chernivets'koho un –tu: Zb.nauk. prats'. Chernivtsi: Chernivets'kyy nats. un. – t, 2003, Vyp. 167, Heohrafiya. – S. 102 – 106.
- 4 Mikhaylov L.P. i dr. Malaya gidroenergetiki / Pod red. L. P. Mikhaylova. M.: Energoatomizdat, 1989. - 184 s.
- 5 Pro kompleksnu rehional'nu tsil'ovu prohramu rozvytku turyzmu v oblasti na 2016-2020 roky. Zatverdzhena rishennyam XXXIX sesiyi VI sklykannya Ivano-Frankivs'koyi oblasnoyi rady za № 1820 – 39/2015. – [chynna vid 27.10.2015].
- 6 Prohrama rozvytku hidroenerhetyky derzhavy Ukrayina do 2026 roku. [Elektronnyy resurs]: Skhvaleno rozporядzhennyam Kabinetu Ministriv Ukrayiny 13. 07. 2016 r. za № 552-r / Rezhym dostupu: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/552-2016-%D1%80>.
- 7 Prohrama rozvytku turyzmu v Chernivets'kiy oblasti na 2016–2020 roky, zatverdzhena rishennyam IV sesiyi VII sklykannya Chernivets'koyi oblasnoyi rady za № 20 – 4/16. – [chynna vid 15.03.2016].
- 8 Resursy poverhnostnyh vod SSSR. Ukraina i Moldaviya // Pod red. M.S. Kaganera. – L.: Gidrometeoizdat, 1969, T. 6, Vyp. 1. – 884 s.
- 9 Resursy poverhnostnyh vod SSSR. Ukraina i Moldaviya // Pod red. M.S. Kaganera. – L.: Gidrometeoizdat, 1978, T. 7, Vyp. 1. – 490 s.
- 10 Sirotiyuk M.I. Vidnovni energetichni resursi Zakarpats'koï oblasti: ocinka potentsialu ta problemi vikoristannya: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. geograf. nauk: spec.: 11.00.11 – «Konstruktivna geografiya ta racional'ne vikoristannya prirodnih resursiv» / M.I. Sirotiyuk. – L'viv, 1997. – 23 s.
- 11 Smyslov V.V. Gidravlika i aerodinamika : Uchebnik dlya vuzov . – Per. s ukr., perer. i dop. – Kiev: Vishcha shkola. Golovnoe izdatel'stvo, 1979. – 336 s.
- 12 Subbotin A.S. Osnovy gidrotekhniki: Uch. – e posobie. – L.: Gidrometeoizdat, 1983. – 320 s.
- 13 Cependa M.V. Gidroenergetichnij potentsial richok basejnu Seredn'ogo Pridnistrov'ya / M.V. Cependa, M.M. Cependa // Naukovij visnik Chernivec'kogo un-tu: Zb. nauk. prac'. Chernivci: Chernivec'kij nac. un.-t, 2015. – Vip. 762 – 763, Geografiya, S. 72 – 78.
- 14 Chebotarev V.I. Gidrologicheskie i vodnoenergeticheskie raschyoty sel'skih GES. – L.: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1958. – 444 s.
- 15 Energeticheskie resursy SSSR. Gidroenergeticheskie resursy / A.B.Avakyan, V.A.Baranov, L.B.Bernshtejn i dr. // Pod red. A.N. Voznesenskogo. – M.: Nauka, 1967. – 600 s.