

КРИТЕРІЙ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГІДРОСПОРУД ГІРСЬКИХ РІЧОК

CONTINUOUS OPERATION CRITERION OF MOUNTAIN RIVERS' HYDRAULIC DAMS

Систематизовано методику визначення геометричних характеристик гідроспоруд гірських рік. Графічно представлені результати значної кількості виконаних натурних вимірювань та камеральних досліджень. Виокремлено особливості параметрів зруйнованих та проблемних гідроспоруд, які не характерні для стабільно експлуатованих гребель. Запропоновано критерій довготривалої експлуатації гідроспоруд, який встановлює взаємозв'язок між геометричними та витратними характеристиками системи «гідроспоруда — річковий потік — водосховище». Критерій передбачається застосовувати у проектуванні нових гідроспоруд та у моніторингу існуючих.

Ключові слова: гідроспоруди, гірські ріки, параметри навантаженості, натурні вимірювання, стабільна експлуатація, критерій для проектування та моніторингу.

Вступ

Актуальність проблеми. Мінімізація негативних наслідків катастрофічних повеней та паводків пов'язуються зокрема зі стабільним функціонуванням різноманітних річкових гідроспоруд. Обґрунтування конструкції нових гідроспоруд базується із урахуванням усіх можливих аспектів надійності та довговічності, оскільки аварії таких споруд можуть викликати техногенні катастрофи, супроводжувані значними матеріальними збитками та фізичною загрозою для людини. Важливим є формулювання нових критеріїв надійності, які зокрема базуються на порівняльному аналізі стану гідроспоруди з геометричними параметрами системи «гідроспоруда — водосховище — річковий потік» та враховують особливості рельєфу місцевості, ймовірність екологічних наслідків, досвід сталої експлуатації діючих гідроспоруд в Україні та країнах центральної Європи [1–4].

В роботі запропоновано критерій довготривалої експлуатації гідроспоруди, який окреслює необхідні геометричні розміри, достатні для її сталого функціонування. Формулювання критерію базується на натурних вимірюваннях та камеральному аналізі понад 130 дамб і гребель в Україні, Словаччині, Чехії та Польщі. До уваги приймалися як гідроспоруди, що успішно експлуатувались протягом тривалого проміжку часу (10 — 100 років, а в окремих випадках — 500 років), так і повністю чи частково зруйновані гідроспоруди із залишковою здатністю до первинної функції.

Систематизовані дані натурних вимірювань на підставі раніше запропонованої методики [5] уможливили формування емпіричних залежностей геометричних параметрів гідроспоруд від стану гідроспоруди.

Сформульовано узагальнений критерій довготривалої експлуатації системи «гідроспоруда — водосховище — річковий потік», який пов'язує усі геометричні та витратні параметри системи. Аналітичний вираз узагальненого критерію побудовано за допомогою апроксимації числовими методами даних з натурних вимірювань. Отримані вирази є зручними для практичного використання в інженерній практиці під час проектування та будівництва гідротехнічних споруд.

Основні етапи методики

Для повного аналізу взаємозв'язку стану гідроспоруди з геометричними характеристиками, емпіричні дані опрацьовуються у наступній послідовності: натурне та документальне визначення геометричних розмірів греблі, водосховища, живого перерізу потоку ріки, а також витрати води в меженний період; обчислення або визначення із довідкової літератури об'ємних та відносних характеристик системи «гідроспоруда — водосховище — річковий потік».

Геометричні розміри греблі визначаються натурними вимірюваннями, оскільки в інформаційно-довідковій літературі такі дані, як правило, не надаються. Для подальшого використання необхідно визначити за допомогою доступних приладів (далекомір, екліметр, теодоліт, лазерна рулетка тощо) наступні величини: a , b , H_r — довжина, ширина та висота греблі (рисунок 1), α_1 , α_2 — середні значення кутів нахилу укосів греблі до горизонту, H — напір води у меженний період.

Вимірювання розмірів водосховища виконуються тільки у випадку відсутності даних стосовно об'єму води у ньому. Водосховище умовно розділяється на дві частини.

Основна (плоска) частина має берегову лінію близьку за формою до кола, еліпса чи опуклого багатокутника, а її середня глибина співпадає з напором H . Конічна має берегову лінію близьку до трапеції з основами R та r , її глибина зменшується від H до h (рисунок 2). Тут R — ширина русла у місці переходу основної частини у конічну; r , h — ширина та глибина русла ріки поза водосховищем (до водосховища або після греблі), l — довжина звужуваної частини водосховища, α — середній кут нахилу бокового укосу русла до горизонту. Площа поверхні плоскої частини водосховища $S_{пл}$ визначається графічним шляхом. Під час натурних вимірювань необхідно визначити наступні величини: R , l , α , $S_{пл}$.

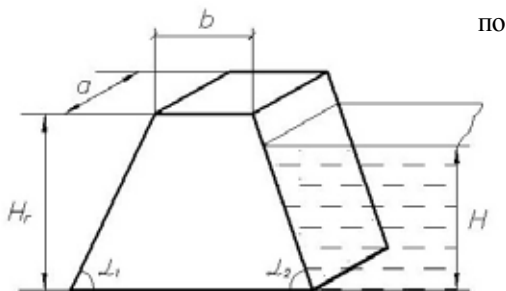


Рисунок 1 — Геометричні розміри греблі

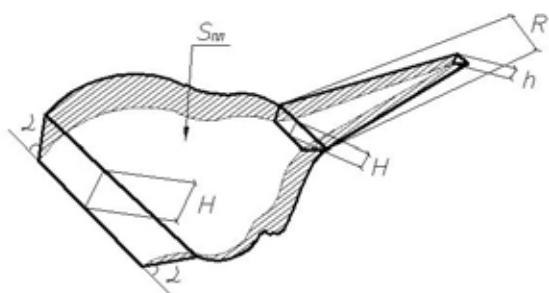


Рисунок 2 — Умовний поділ водосховища та його розміри

Натурні вимірювання параметрів потоку ріки слід виконувати в меженний період після проходження ним греблі на такій віддалі від неї, де рух потоку стає рівномірним. Слід зафіксувати величини r , h — ширину й найбільшу глибину русла ріки та $v_{пл}$ — швидкість поплавка, який рухається поверхнею потоку.

Усі дані натурних вимірювань слід заносити у спеціальний журнал. Бажаним є виконання фотофіксації гідроспоруди, водосховища та потоку ріки, а також відзначення стану гідроспоруди.

Обчислення об'ємних характеристик. Об'єм тіла гідроспоруди визначається співвідношенням:

$$V_T = a \cdot H_T \cdot \left[b + \frac{H_T}{2} (\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_2) \right].$$

Об'єм плоскої частини водосховища визначається у припущенні, що її поверхня — круг із зведеним радіусом $R_{пп} = \sqrt{S_{пл} / \pi}$, а об'єм еквівалентний об'єму відповідного зрізаного конуса. Об'єм звужуваної частини водосховища наближено визначається формулою обеліска [6], якщо вважати, що середня глибина потоку поза водосховищем дорівнює половині його максимальної глибини. Сумарний об'єм водосховища $V_{вд}$

$$V_{вд} = \frac{1}{3} S_{пл} \cdot H \cdot [1 + (1 - k) + (1 - k)^2] + \frac{L}{6} \cdot \left[R \cdot H + (R + r) \cdot \left(H + \frac{h}{2} \right) + r \cdot \frac{h}{2} \right],$$

$$\text{де } k = \frac{H}{R_{пп}} \cdot \operatorname{ctg} \alpha = \sqrt{\frac{\pi}{S_{пп}}} H \cdot \operatorname{ctg} \alpha.$$

Витрата води у меженний період Q обчислюється у припущенні, що переріз русла ріки є круговим сегментом. Середня швидкість потоку визначається співвідношенням [7] $v = 0,75 \cdot v_{попл}$. Тоді:

$$Q = \frac{h \cdot v_{попл}}{20} \cdot \left(6 \cdot r + 8 \cdot \sqrt{\frac{r^2}{4} - h^2} \right).$$

Отже запропоновано [4,5] розглянути наступні відносні геометричні параметри системи «гідроспоруда— водосховище—річковий потік»: коефіцієнт відносного статичного навантаження гідроспоруди водосховищем $K_{ст} = V_{вд} / V_T$; коефіцієнт відносного динамічного навантаження гідроспоруди водосховищем у меженний період $K_{д} = Q_0 / V_T$, $Q_0 = Q_0 \cdot 1 \text{ сек}$ — односекундна витрата води; коефіцієнт змінності $K_3 = Q_0 / V_{вд}$ — частка об'єму водосховища, яка змінюється протягом однієї секунди, коефіцієнт запасу стабільності споруди $\zeta = (H_T - H) / H$.

Для інтегрованого оцінювання і статичного і динамічного впливу водосховища та річкового потоку на гідроспоруду пропонується комплексний параметр

$$K_{компл} = K_{ст} \cdot K_{д}.$$

Опрацювання натурних вимірювань гідроспоруд. Протягом 2008–2014 років здійснено моніторинг 54 гребель в Україні. Результати замірів та розрахунків для 22 з них проаналізовано в [2], а для решти 32 гребель — надано в роботі [8].

Протягом експедицій 2013–2014 років гідроспорудами гірської частини Словаччини та двох гірських регіонів Польщі [9], отримано дані стосовно 74 гідроспоруд, систематизовані у роботі [8]. Частину результатів отримано за використання програмних засобів *Google Earth* та *Google Earth Pro* та деяких даних електронного ресурсу фірми ТАУРОН.

Отримані дані для усіх вказаних вище 128 об'єктів «гідроспоруда— водосховище — річковий потік» надано на координатній площині $K - 0 - \lg (V_{вд}^0)$ (рисунок 3), $(V_{вд}^0)$ — безрозмірний об'єм водосховища.

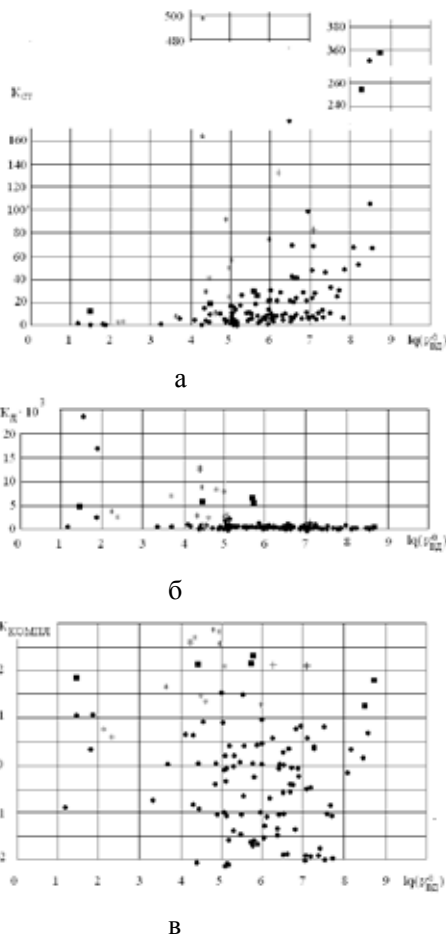


Рисунок 3 — Параметри навантаження гідроспоруд: а — статичного, б — динамічного, в — комплексного;
■ — стабільно функціонуюча гребля, * — тимчасова (дерев'яна) або зруйнована, □ — залізобетонна.

Будування критерію довготривалої експлуатації. Із аналізу отриманих результатів відзначимо наступне. Параметри K_{CT} утворюють на координатній площині таку множину точок, що можливо припустити існування віртуальної кривої:

$$V_T = a \cdot H_T \cdot \left[b + \frac{H_T}{2} (\text{ctg} \alpha_1 + \text{ctg} \alpha_2) \right], \quad (1)$$

яка відділяє область параметрів стабільно експлуатованих гребель від області параметрів гребель аварійних та в незадовільному стані. Точки параметрів успішно експлуатованих гідроспоруд знаходяться під цією кривою, а пошкоджених чи зруйнованих — над нею. Цю обставину можна використовувати як додаткову умову для розрахунку і проектування нових гребель, а також для перевірки довговічності експлуатованих гідроспоруд.

У випадку, коли значення параметра K_{CT} для проектової чи існуючої греблі є більшим за величину K_{CT}^* (1), існує ризик руйнування такої споруди. Для забезпечення успішної довготривалої експлуатації греблі необхідне виконання наступної умови:

$$R_{PP} = \sqrt{S_{PL} / \pi}. \quad (2)$$

Поряд з умовою (2) зазначимо, що для гідроспоруди, параметр K_{CT} якої є значно меншим за величину K_{CT}^* (1)

$$V_{BD} = \frac{1}{3} S_{PL} \cdot H \cdot [1 + (1-k) + (1-k)^2] + \frac{L}{6} \cdot \left[R \cdot H + (R+r) \cdot \left(H + \frac{h}{2} \right) + r \cdot \frac{h}{2} \right], \quad (3)$$

запас стабільності є надлишковим. Будівництво такої греблі пов'язується із виконанням надмірної кількості земляних робіт і, як наслідок, невиправданим збільшенням вартості будівництва.

Викладені вище міркування є прийнятними і для інших запроваджених тут параметрів — K_D та $K_{КОМПЛ}$. Вважатимемо, що існують криві

$$K_D^* = K_D^* (\lg(V_{BD}^0)), \quad K_{КОМПЛ}^* = K_{КОМПЛ}^* (\lg(V_{BD}^0)) \quad (4)$$

такі, що для гребель, успішна експлуатація яких є довготривалою, виконуються наступні умови:

$$K_D \leq K_D^*, \quad K_{КОМПЛ} \leq K_{КОМПЛ}^*. \quad (5)$$

Запровадження нижньої межі дійсних значень K_D та $K_{КОМПЛ}$ необхідне для уникнення випадку, подібного (3).

Безпосереднє використання для проектування та розрахунків графіків рисунку 3 та відношень (1)—(5) є певною мірою ускладненим, оскільки слід виконувати суб'єктивні графічні співставлення характеристик проектованих гребель з емпірично отриманою множиною точок

Рациональним вважається визначення аналітичних виразів емпіричних залежностей

$$K_{CT} = K_{CT}^P (\lg(V_{BD}^0)), \quad K_D = K_D^P (\lg(V_{BD}^0)), \quad K_{КОМПЛ} = K_{КОМПЛ}^P (\lg(V_{BD}^0)), \quad (6)$$

які усереднюють значення відповідних параметрів успішно експлуатованих гідроспоруд та використання відношень (6) для проектування нових об'єктів. З цією метою із моніторингу, показаного на рисунку 3, було відкинуто параметри проблемних гідроспоруд, відібрано параметри успішно експлуатованих гребель і для них, за використання програмного середовища EXCEL, збудовано відповідні апроксимаційні криві (суцільні лінії на рисунку 4) та визначено їх аналітичні вирази. Із врахуванням цих виразів критерій довготривалої експлуатації для проектованих гідроспоруд пропонується у наступному вигляді.

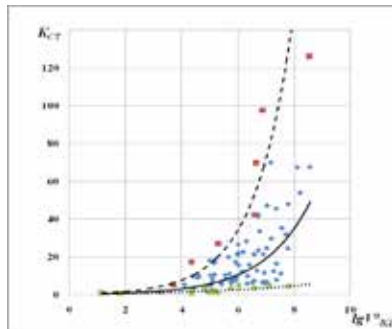
$$K_{CT} = 0,295 \cdot \exp(0,597 \lg V_{BD}^0)$$

$$K_D = 0,001 \cdot (\lg V_{BD}^0)^{-2,68}$$

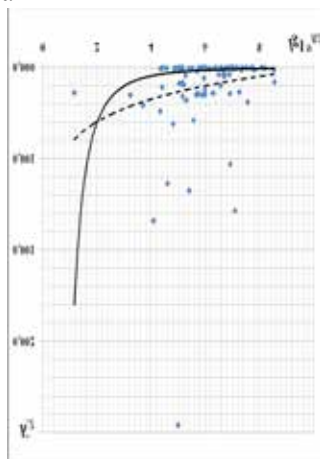
$$\lg(K_{КОМПЛ} \cdot 10^3) = -0,170 \cdot \ln(\lg V_{BD}^0) - 0,390. \quad (7)$$

Дані моніторингу гідроспоруд, подані на рисунку 3, засвідчують певне відхилення дійсних параметрів успішно експлуатованих протягом тривалого періоду часу гребель від заданих виразами (7) кривих. З метою визначення допустимих граничних значень такого відхилення вибрано

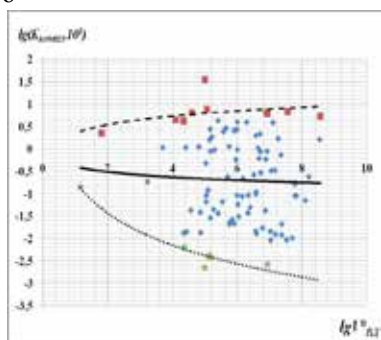
параметри верхньої та нижньої межі спостережень, виділені квадратами на рисунку 4: для цих точок збудовано апроксимаційні криві максимальних (пунктирні лінії) та мінімальних (дрібні пунктирні лінії) допустимих значень параметрів та визначено їх аналітичні вирази. Отримані таким чином результати встановлюють допустимі з огляду забезпечення довготривалої експлуатації гідроспоруд обмеження на запроваджені вище параметри навантаженості.



а



б



в

Рисунок 4 — Будування апроксимуючих кривих для коефіцієнта статичного навантаження (а), коефіцієнта динамічного навантаження (б) та комплексного коефіцієнта (в).

Математичний вираз обмежень має вигляд наступних нерівностей:

$$\begin{aligned} 0,485 \cdot \exp(0,284 \lg V_{БД}^0) &\leq K_{CT} \leq \\ &\leq 0,401 \cdot \exp(0,742 \lg V_{БД}^0) \\ K_{д} &\leq -0,00018 \cdot \ln(\lg V_{БД}^0) + 0,00042 \\ -1,03 \cdot \ln(\lg V_{БД}^0) - 0,716 &\leq \lg(K_{компл} \cdot 10^3) \leq \\ &\leq -0,278 \cdot \ln(\lg V_{БД}^0) + 0,351. \end{aligned} \quad (8)$$

Результати (8) пропонується використовувати для моніторингу та аналізу ресурсу експлуатованих гідроспоруд.

Висновки

- Запропоновано критерій успішної довготривалої експлуатації гідроспоруд на гірських ріках, який пов'язує геометричні параметри споруди і водосховища, витратну характеристики потоку води.
- Побудовано математичний вираз запровадженого критерію.
- Критерій успішної довготривалої експлуатації гідроспоруд на гірських ріках можливо використовувати для проектування нових гребель і для перевірки ресурсу існуючих.

Література

- Библюк, Н.І. Небезпечні стихійні явища в Карпатах: Причини виникнення та шляхи їх мінімізації/ Н.І. Библюк, І.П. Ковальчук, О.С. Мачуга// Наукові праці Лісівничої академії наук України: збірник наукових праць. — Львів:РВВ НЛТУ України. — 2008. — Вип. 6. — С. 105 — 119.
- Мачуга, О.С. Порівняльний аналіз стану та параметрів навантаженості гідроспоруд гірських річок/ О.С. Мачуга// Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць. — Львів: РВВ НЛТУ України. — 2009. — Вип. 19.5. — С. 71—80.
- Библюк, Н.І. Науково-технічні аспекти запобігання негативному впливові господарської діяльності на довкілля / Н.І. Библюк, О.А. Стиранівський, О.С. Мачуга// Промислова гідрравліка і пневматика. — 2010. — № 1 (27). — С. 3—9.
- Мачуга, О.С. Параметри навантаженості та паводкової стійкості гірських рік/ О.С. Мачуга, Н.В. Шевченко// Промислова гідрравліка і пневматика. — 2010.— № 2(28). — С. 14—17.
- Мачуга, О.С. Методика дослідження геометричних характеристик гідротехнічних споруд та водосховищ/ О.С. Мачуга// Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць. — Львів: РВВ НЛТУ України. — 2010. — Вип. 20.11. — С. 67 — 70.

6. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике/ И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. — М.: Наука, 1981. — 720 с.

7. Гірські автомобільні дороги Українських Карпат/ за ред. В.О. Герасимчука. — Ужгород: Закарпаття, 2000. — 242 с.

8. Мачуга, О.С. Натурні вимірювання та порівняльний аналіз параметрів гідроспоруд на малих ріках в Україні/ О.С. Мачуга// Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць. — Львів: РВВ НЛТУ України. — 2014. — Вип. 24.8. — С. 181—195.

9. Мачуга, О.С. Натурні вимірювання та порівняльний аналіз параметрів гідроспоруд на малих річках у Словаччині та Польщі/ О.С. Мачуга// Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць. — Львів: РВВ НЛТУ України. — 2014. — Вип. 24.10. — С. 134—145.

References

1. Byblyuk, N.I. Nebezpechni styhijni javushcha v Karpatah: Prychyny vynyknennia ta shliahy jih minimizaciji/ N.I. Byblyuk, I.P. Kovalchuk, O.S. Machuga// Naukovi praci Lisivnychoji akademii nauk Ukrainy: zbirnyk naukovykh prac. — Lviv: RVV NLTU Ukrainy. — 2008. — Vyp. 6. — P. 105 — 119.

2. Machuga, O.S. Porivnialnyj analiz stanu ta parametriv navantaznosti gidrosporud girskych richok/ O.S. Machuga// Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy: zbirnyk naukovykh prac. — Lviv: RVV NLTU Ukrainy. — 2009. — Vyp. 19.5. — P. 71 — 80.

3. Byblyuk, N.I. Naukovo-tehnichni aspekty zapobigannia negatyvnomu vplyvovi gospodarskoji diialnosti na dovkillia/ N.I. Byblyuk, O.A. Styranivskij, O.S. Machuga// Promyslova gidravlika i pnevmatyka. — 2010. — № 1(27). — S. 3—9.

4. Machuga, O.S. Parametry navantaznosti ta pavodkovoji stijkostigirskych rik / O.S. Machuga, N.V. Shevchenko// Promyslova gidravlika i pnevmatyka. — 2010. — № 2(28). — P. 14 — 17.

5. Machuga, O.S. Metodyka doslidzennia geometrychnykh harakterystyk gidrotehnychnykh sporud ta vodoshovyshch/ O.S. Machuga// Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy: zbirnyk naukovykh prac. — Lviv: RVV NLTU Ukrainy. — 2010. — Vyp. 20.11. — S. 67 — 70.

6. Bronshtein, I.N. Spravochnik po matematike/ I.N. Bronshtein, K.A. Semendiajev. — M.: Nauka, 1981. — 720 s.

7. Girska avtomobilni dorogy Ukrainskykh Karpat/ za red. V.O. Gerasymchuka. — Uzhgorod: Zakarpattia, 2000. — 242 s.

8. Machuga, O.S. Naturni vumiruvannia ta porivnialnyi analiz parametriv hidrosporud na malykh rikakh v Ukraini/ O.S. Machuga// Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy: zbirnyk naukovykh prac. — Lviv: RVV NLTU Ukrainy. — 2014. — Vyp. 24.8. — P. 181 — 195.

9. Machuga, O.S. Naturni vumiruvannia ta porivnialnyi analiz parametriv gidrosporud na malyh rikah u Slovachchyni ta Polshchi / O.S. Machuga// Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy: zbirnyk naukovykh prac. — Lviv: RVV NLTU Ukrainy. — 2014. — Vyp. 24.10. — S. 134 — 145.

Надійшла

УДК 627.8

Критерий длительной эксплуатации гидросооружений на горных реках

О.С. Мачуга,
Н.В. Шевченко

Систематизирована методика определения геометрических характеристик гидросооружений на горных реках. Графически представлены результаты значительного количества выполненных натурных измерений и камеральных исследований. Выделены особенности параметров разрушенных и проблемных гидросооружений, которые не характерны для стабильно эксплуатируемых плотин. Предложен критерий длительной эксплуатации гидросооружений, который устанавливает взаимосвязь между геометрическими и расходными характеристиками системы «гидросооружение — речной поток — водохранилище». Критерий предусматривается применять в проектировании новых гидросооружений и в мониторинге существующих.

Ключевые слова: гидросооружения, горные реки, параметры нагруженности, натурные измерения, стабильная эксплуатация, критерий для проектирования и мониторинга.

UDK 627.8

Continuous operation criterion of mountain rivers' hydraulic dams

O.S. Machuga,
N.V. Shevchenko

The determining method of the geometric characteristics of the mountain rivers' hydraulic dams is systematized. In particular, there are defined the dams' and reservoirs' volumes and the water discharge in the low-flow period. It is taken into consideration the static load parameter-ratio of dam's volume to reservoir's volume, the dynamic load parameter-ratio of one second water discharge to reservoir's volume and the complex parameter — previous two parameters product. The results of

a significant number of performed field measurements and cameral studies (128 units) are presented graphically. There are determined the parameters' features for the damaged and problematic dams, which are not specific to stably maintained dams. The long-term hydraulic dam operation criterion, which establishes the relationship between geometric characteristics and water discharge parameters of the system "hydraulic struc-

ture — river stream — reservoir" is proposed. It is appropriate to use the introduced criterion for the new hydraulic structures design. Besides that, this criterion can be used for the existing dams' resource monitoring.

Keywords: hydraulic dam, mountain's rivers, loading parameters, the full scale measurement, stable operation, design and monitoring criteria.