

Енергетичний підхід у дослідженні поведінки гідромеханічної системи «річковий потік — гідротехнічна споруда — водосховище»

Energy approach in the research of the hydromechanical system «river flow — hydrotechnical construction — water reservoir» behavior

О. С. Мачуга, канд. фіз.-мат. наук

Національний лісотехнічний університет України, Львів, Україна,

О. М. Яхно, д-р техн. наук, Сейед Фаршад Разави

Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», Київ, Україна

Мета. Будівництва критерію довготривалої успішної експлуатації гідромеханічної системи «річковий потік — гідротехнічна споруда — водосховище» за допомогою енергетичного підходу.

Методи дослідження. Використовуються методи варіаційних нерівностей в просторі енергетичних станів розглядуваної гідромеханічної системи у поєднанні із структуризуванням енергетичного ресурсу на суму ексергії та анергії. Використовуються методи натурних спостережень та камерального аналізу для визначення енергетичних характеристик досліджуваного об'єкта.

Результати дослідження. Збудовано критерій довготривалої успішної експлуатації гідромеханічної системи «річковий потік — гідротехнічна споруда — водосховище». Цей критерій пов'язує потенційну енергію, накопичену водою у водосховищі, потенційну енергію тіла гідроспоруди та кінетичну енергію річкового потоку у межений період. Вказаний критерій ґрунтується на виявленні умов енергетичного балансу досліджуваної гідромеханічної системи, які отримано теоретичними методами. Поряд із цим, збудований критерій цілковито співпадає із результатами натурних спостережень, які охоплюють 128 наявних гідроспоруд у різних країнах центральної Європи, що підтверджує його достовірність. Для практичного використання збудованого критерію, енергетичний ресурс досліджуваної гідромеханічної системи виражено через об'єм тіла гідротехнічної споруди, об'єм води у водосховищі та витрату води у річковому потоці.

Висновки. Збудований критерій довготривалої успішної експлуатації гідромеханічної системи «річковий потік — гідротехнічна споруда — водосховище» слід використовувати на практиці проектування та будівництва гідротехнічних споруд, які формують водосховище. Це дозволить зменшити ризик руйнування відповідної гідротехнічної споруди, а також раціоналізувати обсяги земляних робіт для уникнення необґрунтованого збільшення вартості будівництва.

Ключові слова. Гідроспоруди, енергетична рівновага, ексергія, анергія, критерій довготривалої успішної експлуатації.

Вступ

Геоморфологічні, метеорологічні та значною мірою антропогенні чинники зумовлюють збільшення інтенсивності й повторюваності паводків, а також спричинених ними селевих потоків й зсувів ґрунту [1]. Зростає небезпека катастрофічних руйнівних наслідків таких явищ: відзначимо зокрема повінь на річці Черемош у 2008 р., повінь на річках Тересля та Латориця у 2017 р., які спричинили руйнування мостів та дамб, затоплення значних територій.

Один із шляхів запобігання таким негативним явищам пов'язується із удосконаленням методів проектування та будівництва гідротехнічних споруд, урахуваючи досвід успішної довготривалої експлуатації наявних гідроспоруд. Таке вдосконалення вбачається у використанні методів енергетичного підходу щодо дослідження поведінки гідромеханічної системи у поєднанні із натурними спостереженнями і камеральним аналізом експлуатованих гідротехнічних споруд.

Практичне зацікавлення у використанні для господарських цілей енергії природних руслових потоків, спонукало до розвитку досліджень гідромеханічної системи «річковий потік — гідротехнічна споруда — водосховище», зокрема, методами технічної гідромеханіки [2—5] та низки інших досліджень. Вказані вище праці опираються в основному на математичні моделі, які формуються на інженерних підходах, емпіричних та

напівемпіричних засобах аналізу, пов'язаних зокрема із використанням рівняння руху рідини у вигляді інтеграла Бернуллі. Енергетичний підхід використовувався для обґрунтування понять критичної глибини потоку та бурхливість [4, 5].

Питання тривалої експлуатації розглядуваної гідромеханічної системи складно охопити існуючими підходами. В даній роботі засобами енергетичного підходу [6] досліджуються умови довготривалого стабільного функціонування гідромеханічної системи «річковий потік — гідроспоруда — водосховище». Метою дослідження є будівництво критерію довготривалої експлуатації такої системи за використання теоретичних методів енергетичного підходу та обґрунтування цього критерію шляхом його співставлення із емпіричними даними натурних спостережень та камерального аналізу [7] щодо функціонування вказаної вище гідромеханічної системи.

Постановка задачі

Розглянемо гідромеханічну систему «річковий потік — гідротехнічна споруда — водосховище», елементи якої подано на рисунку 1.

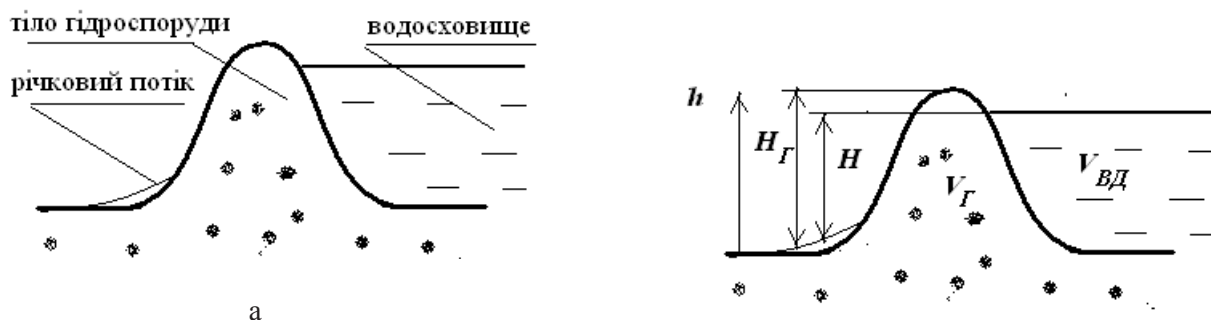


Рисунок 1 — Гідромеханічна система «річковий потік — гідротехнічна споруда — водосховище»: а — поперечний перетин, б — позначення

Гідротехнічна споруда, поперечна до річкового потоку гребля формує утворення відповідного водосховища. Нехай H_G — висота гідроспоруди відносно нижнього б'єфу (рівня води в потоці нижче за течією стосовно гідроспоруди), H — напір гідроспоруди, V_G — об'єм тіла гідроспоруди, $V_{ВД}$ — об'єм води у водосховищі, Q — витрата води у річковому потоці, Q_0 — об'єм односекундної витрати води річкового потоку, S_0 — площа поверхні водосховища, h — біжуча координата уздовж вертикалі.

На гідроспоруду діють два головних чинники: водосховище та річковий потік, які за певних умов можуть вивести із рівноваги розглядану систему, розмити та знести гідроспоруду, наситити її водою тощо. Не деталізуючи гідроморфологічних чинників такого можливого руйнування відзначимо, що стабільна експлуатація розглядуваної системи еквівалентна її енергетичній рівновазі. Для визначення умов такої стабільності застосуємо методологію енергетичного підходу, пов'язану із формулюванням варіаційної нерівності [6], записаної для складових енергетичного ресурсу системи — ексергію Ex й Анергію

$$\delta(Ex - An) \leq 0, \quad (1)$$

де δ — оператор варіювання.

Ексергія розглядуваної $E_{II}^{ВД}$ системи співпадає із сумою потенційної енергії E_K , накопиченою водою у водосховищі та кінетичною енергією річкового потоку, оскільки ці енергетичні чинники можуть передаватись іншим складовим розглядуваної гідромеханічної системи шляхом виконання відповідної механічної роботи:

$$Ex = E_{II}^{ВД} + E_K. \quad (2)$$

Анергія розглядуваної системи чисельно співпадає із поверхневою енергією складових часточок матеріалу греблі. Сумарна дія водосховища та річкового потоку на гідроспоруду може викликати її руйнацію шляхом розмивання, знесення матеріалу греблі водним потоком. Тобто анергія системи є інтегральною величиною енергії, необхідної для розділення та знесення частинок матеріалу греблі [8]. Вважатимемо, що для знесення матеріалу гідроспоруди, об'єм тіла якої V_G необхідно витратити енергію

$$E_{зН} = \chi \cdot V_G \quad (3)$$

де χ — питома об'ємна енергія, необхідна для розмивання і знесення одиниці об'єму матеріалу гідроспоруди.

Задача полягає у визначенні умови успішної довготривалої експлуатації гідромеханічної системи, поданої на рисунку 1, виходячи із умов енергетичного балансу (1).

Виклад основного матеріалу

Ресурс потенційної енергії водосховища вираховуватиметься наступним чином

$$E_{II}^{БП} = \int_{V_{БП}} \rho g h dV = \int_0^H \rho g S(h) h dh, \quad (4)$$

де $S(h)$ — площа горизонтального перерізу водосховища на висоті h від умовної площини його дна, $0 \leq h \leq H$. Для водосховища циліндричної форми маємо

$$S(h) = S_0, \quad E_{II}^{БП} = \frac{\rho g H}{2} V_{БП}, \quad (5)$$

а для водосховища конічної форми:

$$S(h) = S_0 \frac{h}{H}, \quad E_{II}^{БП} = \rho g H \cdot V_{БП}. \quad (6)$$

У загальному випадку форми водосховища на підставі (5) та (6) приймаємо

$$E_{II}^{БП} = \rho g H \cdot k \cdot V_{БП}, \quad (7)$$

де k — коефіцієнт впливу форми водосховища на його енергетичний ресурс: $h = 1$ — конус, $h = 0,5$ — циліндр, $0,5 \leq h \leq 1$ — загальний випадок (коноїд, зрізаний конус тощо).

Важливим у залежності (7) є встановлення пропорційності між частиною $E_{II}^{БП}$ ексергії системи та об'ємом водосховища.

Частина ексергії гідромеханічної системи «річковий потік — гідротехнічна споруда — водосховище» пов'язана із кінетичною енергією потоку E_K , яку можна представити наступним чином:

$$E_K = \frac{mv^2}{2} = \frac{m Q^2}{2 S^2} = \frac{m Q_0^2}{2 S^2 t_0^2} = B \cdot Q_0^2, \quad (8)$$

де v — середня швидкість річкового потоку, m — маса порції води, яка є істотною для розмивання гідроспоруди, Q — витрата води, S — площа живого перерізу потоку, S_0 — об'єм односекундної витрати води, $t_0 = 1$ с, $B = m / (2S^2 t_0^2)$.

Відзначимо у (8) квадратичну залежність кінетичної енергії від односекундної витрати води.

Анергію розглядуваної гідромеханічної системи визначимо відповідно до вищевказаних міркувань та відношення (3):

$$An = E_{зН}. \quad (9)$$

Розглянемо граничний стан гідромеханічної системи «річковий потік — гідроспоруда — водосховище» для випадку, коли односекундною витратою потоку Q_0 можна знехтувати у порівнянні із об'ємом водосховища. Для такого випадку запишемо варіаційну нерівність (1) наступним чином:

$$\frac{\delta Ex}{\delta An} \leq 0 \Rightarrow \delta \left(\frac{Ex}{An} \right) \leq 0 \equiv \delta C, \quad (10)$$

де C — довільна постійна, варіація якої тотожна нулю. Оскільки нерівність (10) вказує на низхідний характер відношення ексергії до анергії, то така ж нерівність буде справедлива і для логарифма відношення

$$\delta \lg \left(\frac{Ex}{An} \right) \leq 0 \equiv \delta C. \quad (11)$$

Позбуваючись у (11) варіацій, отримуємо

$$\lg \frac{Ex}{An} \leq C, \quad (12)$$

а після використання виразів ексергії та анергії (7), (9) отримуємо

$$1g \frac{\rho g H k \cdot V_{ВД}}{\chi \cdot V_{Г}} \leq C \Rightarrow 1g \frac{V_{ВД}}{V_{Г}} \leq C - 1g \frac{\rho g H k}{\chi} \equiv K_I, \quad (13)$$

або в іншій формі

$$V_{Г} \geq \frac{V_{ВД}}{10^{K_I}}, \quad (14)$$

де K_I — модуль, запроваджений у виразі (13). Відношення (14) має характер критерію стабільної довготривалої експлуатації гідромеханічної системи «річковий потік — гідроспоруда — водосховище» для випадку незначних витрат води у порівнянні із об'ємом водосховища. Зазначимо, що модуль K_I може залежати від матеріалу греблі, від об'єму та конфігурації водосховища та інших чинників.

Розглянемо випадок, коли об'єм водосховища є відносно невеликим у порівнянні із одnoseкундною витратою води у річковому потоці. Для такого випадку використаємо вираз ексергії у вигляді (8). Тоді, діючи аналогічно до вищенаведених міркувань, отримаємо

$$1g \frac{Q_0}{V_{Г}} \leq C' - 1g \frac{B \cdot Q_0}{\chi} \equiv K_{II}, \quad (15)$$

C' — довільна постійна. Із (15) отримуємо

$$V_{Г} \geq \frac{Q_0}{10^{K_{II}}}. \quad (16)$$

Вираз (16) є критерієм для визначення умови стабільної довготривалої експлуатації об'єкта для випадку значних витрат води у річковому потоці у порівнянні із об'ємом водосховища. Модуль K_{II} може залежати від об'єму водосховища, матеріалу греблі та витратних характеристик потоку.

Критерії (14), (16) визначають умови сталої довготривалої експлуатації гідромеханічної системи у часткових випадках її функціонування. Для загального випадку такої критерій пропонується у наступному вигляді:

$$1g \frac{V_{ВД}}{V_{Г}} + 1g \frac{Q_0}{V_{Г}} = 1g \left(\frac{V_{ВД}}{V_{Г}} \cdot \frac{Q_0}{V_{Г}} \right) \leq K = K_I + K_{II}, \quad (17)$$

де K — комплексний модуль, який визначає загальну умову успішної довготривалої експлуатації гідроспоруди. Значення цього модуля слід визначати дослідним шляхом. Критерій (17) необхідно враховувати у проектних розрахунках нових та упродовж моніторингу існуючих гідроспоруд.

З метою апробації критерію (17) розглянемо результати натурних спостережень та камерального аналізу наявних систем «річковий потік — гідротехнічна споруда — водосховище» [7]. Зокрема отримано емпіричні величини запровадженого у вказаній роботі комплексного коефіцієнта $K_{КОМПЛ}^{МЕЖ}$:

$$K_{КОМПЛ} = \frac{V_{ВД}}{V_{Г}} \cdot \frac{Q_0}{V_{Г}}, \quad (18)$$

які подано на рисунку 2.

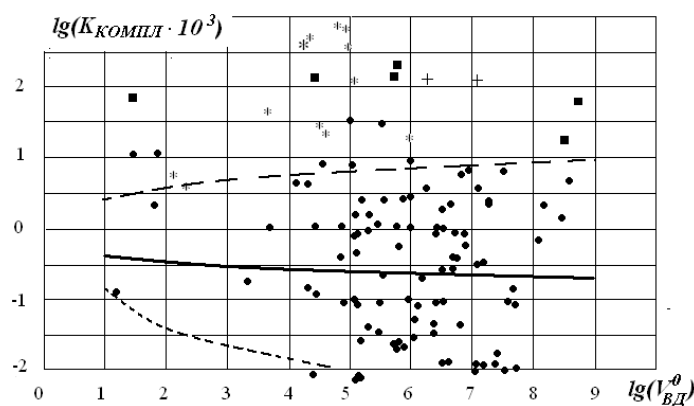


Рисунок 2 — Комплексний коефіцієнт для різних об'єктів спостереження: • — стабільно функціонуюча гребля, * — тимчасова (дерев'яна) або зруйнована, ■ — залізобетонна; + — реконструкція

На рисунку 2 представлено апроксимуючі криві для $K_{КОМПЛ}^{МЕЖ}$. Суцільна лінія визначає усереднену величину $K_{КОМПЛ}^{МЕЖ}$ успішно довготривало експлуатованих об'єктів, штрихова лінія — верхню межу значень $K_{КОМПЛ}^{МЕЖ}$, розділяючи значення успішно експлуатованих об'єктів від проблемних, дрібно штрихова лінія окреслює об'єкти, споруджені із надлишковим запасом міцності. Для усереднених показників $K_{КОМПЛ}^{МЕЖ}$

$$\lg(K_{КОМПЛ}^V \cdot 10^3) = -0,170 \cdot \ln(\lg V_{ВД}^0) - 0,390, \quad (19)$$

а для верхніх граничних значень $K_{КОМПЛ}^{МЕЖ}$

$$\lg(K_{КОМПЛ}^{МЕЖ} \cdot 10^3) = -0,278 \cdot \ln(\lg V_{ВД}^0) + 0,351. \quad (20)$$

Таким чином, дослідно встановлений критерій успішної довготривалої експлуатації гідромеханічної системи «річковий потік — гідроспоруда — водосховище» має наступний вигляд:

$$\lg(K_{КОМПЛ} \cdot 10^3) \leq \lg(K_{КОМПЛ}^{МЕЖ} \cdot 10^3). \quad (21)$$

У інженерній практиці, враховуючи вигляд суцільної лінії на рисунку 2, критерій (21) можливо застосовувати для моніторингу наявних об'єктів у наступному спрощеному вигляді:

$$\lg(K_{КОМПЛ} \cdot 10^3) \leq 1. \quad (22)$$

Для проектних розрахунків нових об'єктів доцільно використовувати усереднене значення комплексного коефіцієнта. Тоді, враховуючи (19) та рисунок 2, запишемо:

$$\lg(K_{КОМПЛ} \cdot 10^3) \approx -0,5. \quad (23)$$

$$K = \lg K_{КОМПЛ}, \quad (24)$$

встановлюємо цілковиту ідентичність теоретичного (17) та емпіричного (21) критеріїв успішної довготривалої експлуатації гідромеханічної системи «річковий потік — гідроспоруда — водосховище».

Для практичного застосування доцільно трансформувати ці вирази, визначивши необхідний об'єм тіла гідроспоруди, враховуючи спрощення (22) та (23).

Для проектних розрахунків та планування обсягів земляних робіт, критерій (17)—(21) матиме вигляд:

$$V_{Г} \approx 56,2 \sqrt{V_{ВД} \cdot Q_0}. \quad (25)$$

Для визначення границі подальшої успішної довготривалої експлуатації упродовж моніторингу наявних гідроспоруд критерій (17)—(19) набуде вигляду

$$V_{Г} \geq 10,0 \sqrt{V_{ВД} \cdot Q_0}. \quad (26)$$

Висновки

За використання методів енергетичного підходу збудовано критерій успішної довготривалої експлуатації гідромеханічної системи «річковий потік — гідроспоруда — водосховище» та доведено його прийнятність шляхом співставлення із відомими емпіричними даними. Запропонований критерій доцільно використовувати у практиці проектування та будівництва гідротехнічних споруд, які формують водосховище. Це дозволить зменшити ризик руйнування відповідної гідротехнічної споруди, а також раціоналізувати обсяги земляних робіт для уникнення необґрунтованого збільшення вартості будівництва. Крім того, критерій може слугувати підставою моніторингу наявних об'єктів з метою визначення їх межі залишкової придатності.

Література

1. 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 ЛАН України: збірник наукових праць. — Львів: РВВ НЛТУ України, 2008. — Вип. 6. — С. 105 — 119.
2. Избаш, С. В. Гидравлика в производстве работ / С. В. Избаш. — Москва:ГИ, 1949. — 272 с.
3. Бахметев, Б. А. О неравномерном движении жидкости в открытом русле / Б. А. Бахметев. — Ленинград: Гостехиздат, 1932. — 305 с.

4. Справочник по гидравлике / под ред. В. А. Большакова. — Киев: Вищ. школа, 1984. — 340 с.
5. Ткачук, С. Г. Теоретична формула граничної глибини місцевого розмиву біля мостових опор в зв'язних ґрунтах / С. Г. Ткачук // Гідравліка і гідротехніка. — Київ: НТУ України, 2012. — вип. 66. — С. 62 — 69.
6. Мачуга, О. С. Застосування енергетичного підходу до аналізу поведінки неідеалізованих механічних та гідромеханічних систем / О. С. Мачуга, О. М. Яхно // *Mechanics and Advanced Technologies*, 2018. — №82, т.1. — С. 43—50.
7. Мачуга, О. С. Критерій довготривалої експлуатації гідроспоруд гірських річок / О. С. Мачуга, Н. В. Шевченко // *Промислова гідравліка і пневматика*. — 2015. — № 3. — С. 7—12.
8. Яхно, О. М. Ексергійний аналіз та метод варіаційних нерівностей в деяких задачах гідромеханіки / О. М. Яхно, О. С. Мачуга // *Вісник НТУУ «КПІ». Сер. «Машинобудуван»*. — 2016. — №3(78). — С. 19 — 25.

References

1. Byblyuk, N. I., Kovalchuk, I. P. & Machuga, O.S. (2008). Nebezpechni stykhiyni yavyscha v Karpatakh: Prychynu vynyknennya ta shlyakhy ikh minimizaciyi [Dangerous natural disasters in the Carpathians. Causes and ways to minimize them]. — *LAN Ukrainy*, 6, 105—119 [In Ukrainian].
2. Izbash, S. V. (1949) *Gidravlika v proizvodstve robot*. [Hydraulics in production]. — Moskva: Gosizdat, 1949. [In Russian].
3. Bakhmetev, B. A. (1932). *O neravnomernom dvizhenii zhydkosti v otkrytom rusle*. [On the uneven movement of fluid in the open channel]. — Leningrad: Gosizdat [In Russian].
4. Bolshakov V. A. (Eds) (1984) *Spravochnik po gidravlike* [Handbook of Hydraulics]. Kiev: Vysh. shkola. [In Ukrainian].
5. Tkachuk, S. G. (2012) *Teoretychna formula granychnoyi glybyny mistseвого rozmyvu bilya mostovykh opor v zvyaznykh gruntakh* [Theoretical formula for the marginal depth of local erosion at bridge supports in coherent soils]. *Hydraulics and hydraulic engineering*, 66, 62—69. [In Ukrainian].
6. Machuga, O. S. & Ykhno, O.M. (2018). *Zastosuvannya energetychnogo pidkhodu do analizu povedinky neidealizovanykh mekhanichnykh ta gidromekhanichnykh system*. [Application of the energy approach to the analysis of the behavior of non-realized mechanical and hydromechanical systems] // *Mechanics and Advanced Technologies*, 82, t.1, 43—50. [In Ukrainian].
7. Machuga, O. S. & Shevchenko, N. V. (2015). *Kryteriy dovgotryvaloi ekspluatatsii gidrosporud richok*. [The criterion of long-term exploitation of hydrosports of mountain rivers] // *Industrial hydraulics and pneumatic*, 3(49), 7—12. [In Ukrainian].
8. Yakhno, O. M. & Machuga, O. S. (2016). *Eksergiynyi analiz ta metod variaciynnykh nerivnostei v deyakykh zadachakh gidromekhaniky*. [Exergy analysis and the method of variational inequalities in some hydromechanics problems]. — *Announcer NTUU «KPI». Mechanical engineering*, 3(78), 19—25. [In Ukrainian].

Надійшла 3.04.2018 року

УДК 627.8

Энергетический подход в исследовании поведения гидро-механической системы «речной поток — гидротехническое сооружение — водохранилище»

О. С. Мачуга, О. М. Яхно, С. Ф. Разави

Цель. Построение критерия длительной успешной эксплуатации гидромеханической системы «речной поток — гидротехническое сооружение — водохранилище» с помощью средств энергетического подхода.

Методы исследования. Используются методы вариационных неравенств в пространстве энергетических состояний рассматриваемой гидромеханической системы в сочетании с структурированием энергетического ресурса на сумму эксергии и анергии. Используются методы натурных наблюдений и камерального анализа для определения энергетических характеристик исследуемого объекта.

Результаты исследования. Построен критерий длительной успешной эксплуатации гидромеханической системы «речной поток — гидротехническое сооружение — водохранилище». Этот критерий связывает потенциальную энергию, накопленную водой в водохранилище, потенциальную энергию тела гидросооружения

и кинетическую энергию речного потока в меженный период. Указанный критерий основывается на условиях энергетического баланса исследуемой гидромеханической системы, полученных теоретическими методами. Наряду с этим, построенный критерий полностью совпадает с результатами натурных наблюдений, которые охватывают 128 существующих гидросооружений в разных странах центральной Европы, что подтверждает его подлинность. Для практического использования построенного критерия энергетический ресурс исследуемой гидромеханической системы выражен через объем тела гидротехнического сооружения, объем воды в водохранилище и расход воды в речном потоке.

Выводы. Построенный критерий длительной успешной эксплуатации гидромеханической системы «речной поток — гидротехническое сооружение — водохранилище» следует использовать в практике проектирования и строительства гидротехнических сооружений, формирующих водохранилище. Это позволит уменьшить риск разрушения гидросооружений, а также рационализировать объемы земляных работ.

Ключевые слова. Гидросооружение, энергетическое равновесие, эксергия, анергия критерий длительной успешной эксплуатации.

UDC 627.8

Energy approach in the research of the hydromechanical system «river flow — hydrotechnical construction — water reservoir» behavior

O. S. Machuga, O. M. Yakhno, S. F. Razavi

Purpose. There is creation of the criterion for long-term successful operation of the hydro mechanical system "river flow — hydro technical structures — water reservoir" using the energy approach.

Methods. The methods of variational inequalities in the space of energetic states of the considered hydro mechanical system in combination with the structurization of the energy resources as the sum of exergy and energy are used. The methods of field observations and camera analysis are used to determine the energy characteristics of the investigated object.

Research results. The criterion of long-term successful operation of the hydro mechanical system "river flow — hydro technical structure — water reservoir" is constructed. This criterion relates the potential energy accumulated in the water reservoir, the potential energy of the body of the dam and the kinetic energy of the river flow. The criterion based on the energy balance conditions of the investigated hydro mechanical system, which are obtained by theoretical methods. Along with this, the constructed criterion coincides entirely with the results of field observations that cover 128 available hydraulic systems in different Central European countries, which confirms its reliability. For practical usage of the constructed criterion, the energy resource of the investigated hydro mechanical system is expressed through the volume of the body of the hydro technical structure, the volume of water in the reservoir and the river flow volume.

Conclusions. The constructed criterion of long-term successful operation of the hydro mechanical system "river flow — hydro technical structure — water reservoir" should be used in the practice of designing and constructing hydro technical structures that form the reservoirs. This will reduce hydraulic objects destruction risk, and streamline the soil works to avoid unreasonable increase construction costs.

Keywords. Hydraulic structures, energy balance, exergy, energy, criterion for long-term successful operation.

Відомості про авторів

Мачуга Олег Степанович

Національний лісотехнічний університет України

Адреса: вул. Ген. Чупринки, 105, м. Львів, 79057, тел. +38 (097) 432-35-88

e-mail: machuga@kpi.ua

Мачуга Олег Степанович

Національний лесотехнічний університет України

Адреса: ул. Ген. Чупринки, 105, г. Львов, 79057, тел. +38 (097) 432-35-88

e-mail: oleg_mach@kpi.ua

Machuga Oler Stepanovych

Natsionalny lisotekhnichnyi universytet Ukrainy

Adres: vul. Gen. Chuprynyky, 105, Lviv, 79057, Ukraina, tel. +38 (097) 432-35-88

e-mail: machuga@kpi.ua

Яхно Олег Михайлович

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
Адреса: пр. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна, e-mail: o.yakhno@kpi.ua
<https://orcid.org/0000-0002-9522-5549>

Яхно Олег Михайлович

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
Адреса: пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: o.yakhno@kpi.ua
<https://orcid.org/0000-0002-9522-5549>

Yakhno Oleg Mykhailovych

Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut»
Adress: pr. Peremogy, 37, 03056, Kyiv, Ukraina, e-mail: o.yakhno@kpi.ua
<https://orcid.org/0000-0002-9522-5549>

Разаві Сейед Фаршад

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
Адреса: пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,
e-mail: razavi@kpi.ua

Разави Сейед Фаршад

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
Адреса: Адреса: пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: razavi@kpi.ua

Razavi Seied Farshad

Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut»
Adress: pr. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraina
e-mail: razavi@kpi.ua