

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

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 засобів енергетичного підходу.

Методи дослідження. Використовуються методи варіаційних нерівностей в просторі енергетичних станів гідромеханічної системи у поєднанні із структуруванням енергетичного ресурсу на суму ексергії та енергії. 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 цілком співпадає із результатами натурних спостережень, які охоплюють 128 наявних гідроспоруд в 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 в 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, енергія 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 ріці Черемош у 2008 р., повінь на річках Теребля 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 побудовано в основному на математичних моделях, які формуються на інженерних підходах, емпіричних

та напівемпіричних засобах аналізу, пов'язаних зокрема із використанням рівняння руху рідини у формі інтеграла Бернуллі. Енергетичний підхід використовувався для обґрунтування понять критичної глибини потоку та бурхливості [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 показано на рисунку 1. Гідротехнічна споруда є поперечною до річкового потоку і 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, $V_{\hat{A}}$ — об'єм тіла гідроспоруди, $V_{\hat{A}\hat{A}}$ — 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 систему, що розглядається, розмити та знести гідроспоруду, насичити її водою тощо. Не деталізуючи гідроморфологічних чинників такого можливого руйнування відзначимо, що стабільна експлуатація системи, що розглядається, 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 та анергію An

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

де δ — оператор варіювання.

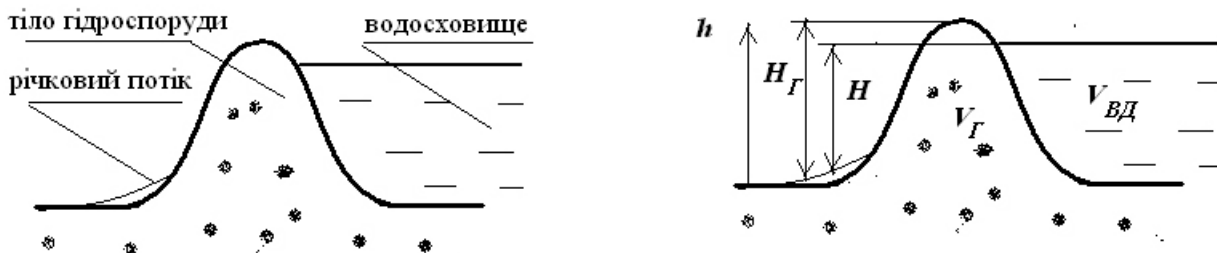


Рисунок 1 — Гідромеханічна система «річковий потік — гідротехнічна споруда — водосховище»: а — поперечний перетин, б — позначення.

Ексергія системи, що розглядається, співпадає із сумою потенційної енергії $E_{\hat{A}\hat{A}}$, накопиченою водою у водосховищі та кінетичною енергією $E_{\hat{E}}$ річкового потоку, оскільки ці енергетичні чинники можуть передаватись іншим складовим гідромеханічної системи шляхом виконання відповідної механічної роботи

$$Ex = E_{\hat{A}\hat{A}} + E_{\hat{E}}. \quad (2)$$

Анергія системи чисельно співпадає із поверхневою енергією складових часточок матеріалу греблі. Сумарна дія водосховища та річкового потоку на гідроспоруду може спричинити 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 $V_{\hat{A}}$ необхідно витратити енергію

$$E_{\text{зн}} = \chi \cdot V_{\hat{A}}, \quad (3)$$

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, показаної на рисунку 1, виходячи із умов енергетичного балансу (1).

Виклад основного матеріалу

Ресурс потенційної енергії водосховища може вираховуватись наступним чином

$$E_{\dot{I}}^{\dot{A}\ddot{A}} = \int_{V_{\dot{A}\ddot{A}}} \rho g h dV = \int_0^H \rho g S(h) h dh, \quad (4)$$

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

$$S(h) = S_0, \quad E_{\dot{I}}^{\dot{A}\ddot{A}} = \frac{\rho g H}{2} V_{\dot{A}\ddot{A}}, \quad (5)$$

а для водосховища конічної форми:

$$S(h) = S_0 \frac{h}{H}, \quad E_{\dot{I}}^{\dot{A}\ddot{A}} = \rho g H \cdot V_{\dot{A}\ddot{A}}. \quad (6)$$

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

$$E_{\dot{I}}^{\dot{A}\ddot{A}} = \rho g H \cdot k \cdot V_{\dot{A}\ddot{A}}, \quad (7)$$

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 (7) є встановлення пропорційності між частиною $\dot{A}_{\dot{I}}^{\dot{A}\ddot{A}}$ 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

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

де v — середня швидкість річкового потоку, m — маса порції води, яка є істотною для розмивання гідроспоруди, Q — витрата води, S — площа живого перерізу потоку; Q_0 — об'єм односекундної витрати води, $t_0 = 1$ сек, $B = m / (2 S^2 t_0^2)$. Відзначимо у (8) квадратичну залежність кінетичної енергії від односекундної витрати води

Анергію гідромеханічної системи, що розглядається, визначимо відповідно до вищенаведених міркувань та відношення (3)

$$An = E_{\dot{C}\dot{I}} = \chi \cdot V_{\dot{A}} \quad (9)$$

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 справедливою і для логарифма такого 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

$$\lg \frac{\rho g H k \cdot V_{\dot{A}\ddot{A}}}{\chi \cdot V_{\dot{A}}} \leq \tilde{N} \Rightarrow \lg \frac{V_{\dot{A}\ddot{A}}}{V_{\dot{A}}} \leq \tilde{N} - \lg \frac{\rho g H k}{\chi} \equiv K_I \quad (13)$$

або в іншій формі

$$V_{\dot{A}} \geq \frac{V_{\dot{A}\ddot{A}}}{10^{K_I}}, \quad (14)$$

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 односекундною витратою води у річковому потоці. Для такого випадку використаємо вираз ексергії у вигляді (8). Тоді, діючи аналогічно до вищенаведених міркувань, отримаємо

$$\lg \frac{Q_0}{V_{\dot{A}}} \leq \tilde{N}' - \lg \frac{B \cdot Q_0}{\chi} \equiv K_{II}, \quad (15)$$

$$\tilde{N}' \text{ — довільна постійна. Із (15) отримуємо } V_{\dot{A}} \geq \frac{Q_0}{10^{K_{II}}}. \quad (16)$$

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.

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

$$\lg \frac{V_{\dot{A}\dot{A}}}{V_{\dot{A}}} + \lg \frac{Q_0}{V_{\dot{A}}} = \lg \left(\frac{V_{\dot{A}\dot{A}}}{V_{\dot{A}}} \cdot \frac{Q_0}{V_{\dot{A}}} \right) \leq K = K_I + K_{II}, \quad (17)$$

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 під час моніторингу існуючих гідроспоруд.

З метою апробації критерію (17) розглянемо результати натурних спостережень та камерального аналізу 128 наявних систем «річковий потік — гідротехнічна споруда — водосховище» [7]. Зокрема отримано емпіричні величини запровадженого у вказаній роботі комплексного коефіцієнта $K_{КОМПЛ}^Y$

$$K_{КОМПЛ}^Y = \frac{V_{\dot{A}\dot{A}}}{V_{\dot{A}}} \cdot \frac{Q_0}{V_{\dot{A}}}, \quad (18)$$

які подано на рисунку 2.

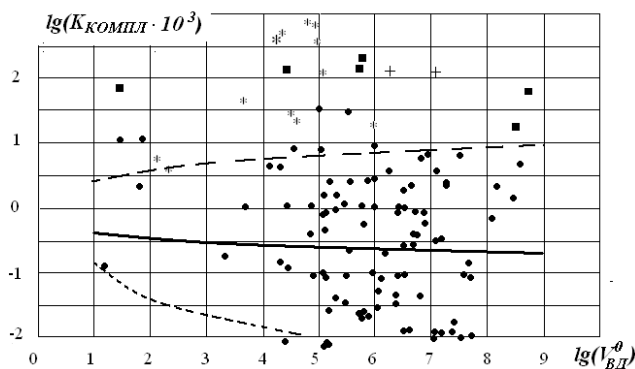


Рисунок 2 — Комплексний коефіцієнт для різних об'єктів спостереження; • — стабільно функціонуюча гребля, * — тимчасова (дерев'яна) або зруйнована, ■ — залізобетонна; + — реконструкція.

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

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

У інженерній практиці, враховуючи вигляд суцільної лінії на рисунку 2, критерій (21) можливо застосовувати для моніторингу наявних об'єктів спрощено

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

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

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

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

Для усереднених показників коефіцієнта

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

а для верхніх межових значень

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

Співставляючи (21) із критерієм (17), отриманим за методами енергетичного підходу, та враховуючи, що $K = \lg K_{\text{КОМПЛ}}$ встановлюємо цілковиту ідентичність теоретичного рівняння (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) набуде вигляду

$$V_{\tilde{A}} \approx 56,2 \sqrt{V_{\tilde{A}\tilde{A}} \cdot Q_0} . \quad (24)$$

Для визначення межі подальшої успішної довготривалої експлуатації під час моніторингу наявних гідроспоруд критерій (17)—(19) матиме вигляд

$$V_{\tilde{A}} \geq 10,0 \sqrt{V_{\tilde{A}\tilde{A}} \cdot Q_0} . \quad (25)$$

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 в 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 у 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 пневмат. — 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. «Машинобудування». — 2016. — №3(78). — С. 19—25.

References

1. Byblyuk, N. I. Nebezpechni stykhiyni yavyshecha u Karpatakh: Prychyny vynyknennya ta shlyakhy ikh minimizatsii / N. I. Byblyuk, I. P. Kovalchuk, O. S. Machuga // Naukovi pratsi LAN Ukrainy: zbirnyk naukovykh prats. — Lviv: RVV NLTU Ukrainy, 2008. — Vyp. 6. — S. 105 — 119.
2. Izbash, S. V. Gidravlika v proizvodstve rabot / S. V. Izbash. — Moskva: Gosizdat, 1949. — 272 s.
3. Bakhmetev, B. A. O neravnomernom dvizhenii zhydkosti v otkrytom rusle / B. A. Bakhmetev. — Leningrad: Gosizdat, 1932. — 305 s.
4. Spravochnik po gidravlike / pod red. V. A. Bolshakova. — Kiev: Vysh. shkola, 1984. — 340 s.
5. Tkachuk, S. G. Teoretychna formula granychnoi glybyny misceвого rozmyvu bilya mostovykh opor v zvyazanykh gruntakh / S. G. Tkachuk // Gidravlika i gidrotekhnika. — Kyiv: NTU Ukrainy, 2012. — vyp. 66. — S. 62—69.
6. Machuga, O. S. Zastosuvannya energetychnogo pidkhodu do analizu povedinky neidealizovanykh mekhanichnykh ta gidromekhanichnykh system / O. S. Machuga, O. M. Yakhno // Mechanics and Advanced Technologies, 2018. — № 82, t.1. — S. 43—50.

7. Machuga, O. S. Kryterii dovgotryvaloї ekspluatatsii gidrosporud richok / O. S. Machuga, N. V. Shevchenko // Promyslova gidravlika i pnevmatyka. — 2015. — No 3(49). — S. 7 — 12.

8. Yakhno, O. M. Eksbergynni analiz ta metod variatsiynnykh nerivnostei v deyakykh zadachakh gidromekhaniky / O. M. Yakhno, O. S. Machuga // Visnyk NTUU «KPI». Ser. «Mashynobuduvania». — 2016. — No3(78). — S. 19 — 25.

Надійшла 31.07.2018

УДК 627.8

UDK 627.8

Энергетический подход в исследовании поведения гидромеханической системы «речной поток — гидротехническое сооружение — водохранилище»

О. С. Мачуга, О. М. Яхно

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 межени 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.

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.

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

O. S. Machuga, O. M. Yakhno

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, anergy, criterion for long-term successful operation.