

Стан гідротехнічних конструкцій гідроелектростанцій Дніпровського каскаду на прикладі Дніпровської ГЕС

Юрій СЛЮСАРЕНКО¹, Володимир ТИТАРЕНКО², Максим МИКОЛАЄЦЬ³,
Ярослав ДОМБРОВСЬКИЙ⁴, Валерій ШУМІНСЬКИЙ⁵

Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»

5/2, вул. Преображенська, Київ, Україна, 03037

¹slus@ndibk.gov.ua, orcid.org/ 0000-0002-0447-3927

²0679199507@ukr.net, orcid.org/ 0000-0001-9746-2399

³mykolayets@ndibk.gov.ua, orcid.org/ 0000-0002-8823-3401

⁴355niisk356@gmail.com, orcid.org/ 0000-0003-0687-1256

⁵shumikvd@gmail.com, orcid.org/ 0000-0002-8751-1983

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.252-268

Анотація. В статті розглянуті результати досліджень стану бетону опор автодорожного переїзду та бетонної водозливної греблі Дніпровської ГЕС, що знаходиться тривалий час (з 1932 року) під впливом природно-кліматичних чинників. Проводилось визначення глибини карбонізації бетону биків з боку верхнього і нижнього б'єфів та у верхній потерні. Оцінка міцності бетону виконувалась із вибуруванням кернів та їх випробуванням в лабораторних умовах.

Важливою задачею гідроенергетики України є забезпечення безпеки та надійності роботи гідротехнічних споруд та охорони навколишнього середовища. Греблі бетонні та залізобетонні – один з найпоширеніших типів гідротехнічних споруд. Вони входять до складу більшості гідровузлів світу. Від їх стану залежить надійна та безпечна робота гідроелектростанцій, вони суттєво впливають на економічну, екологічну та соціальну ситуацію в регіоні їх розташування. Такі греблі будують у різноманітних геологічних умовах. Їх будівництво характеризується високою технологічністю, комплексною механізацією робіт.

Наведені факти щодо підриву двох ГЕС (ДніпроГЕС у 1941 та 1943 роках, Каховської ГЕС у 2023 році та Дніпровської ГЕС1 і ГЕС-2 у 2024 році) та аналіз негативних наслідків злочинного руйнування Каховської ГЕС.

Надійність та безпека гідротехнічних споруд, а також охорона навколишнього природного середовища повинні бути забезпечені в період експлуатації, а також під час ремонту,



Юрій СЛЮСАРЕНКО

заступник директора ДП НДІБК з наукової роботи
к.т.н., с.н.с.



Володимир ТИТАРЕНКО

завідувач відділення «Дослідження технічного стану будівель та споруд при небезпечних геологічних процесах»
к.т.н., с.н.с.



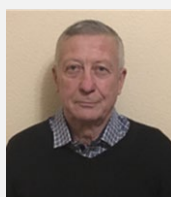
Максим МИКОЛАЄЦЬ

в.о. завідувача відділу «Технології виготовлення залізобетонних конструкцій»
к.т.н.



Ярослав ДОМБРОВСЬКИЙ

завідувач відділу «Дослідження технічного стану будівель та гідротехнічних споруд при небезпечних геологічних процесах»



Валерій ШУМІНСЬКИЙ

провідний науковий співробітник відділення «Дослідження технічного стану будівель та споруд при небезпечних геологічних процесах» к.т.н., доц.

реконструкції, консервації та їх ліквідації. Будівництво ГЕС Дніпровського каскаду дозволило забезпечити вироблення екологічно чистої пікової електроенергії, що створює сприятливі умови роботи енергосистеми України. Відмічена особливо важлива роль Дніпровського каскаду ГЕС в забезпеченні надійної роботи б'єднаної енергетичної системи України та охорони навколишнього середовища, а також здоров'я людей. Наведені особливості роботи гідротехнічних споруд та дана коротка характеристика споруд Дніпровської ГЕС.

Ключові слова. Гідроакумуляуюча електростанція, гідроелектростанція, гідротехнічні споруди, автодорожній переїзд, безпека, опора, водозливна поверхня, карбонізація, керн, міцність, навколишнє середовище, обстеження, оцінка технічного стану.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Гідротехнічні споруди (далі – ГТС) забезпечують надійну та безпечну роботу гідроелектростанцій (далі – ГЕС) та гідроакумуляуючих електростанцій (далі – ГАЕС) і суттєво впливають на економічну, екологічну та соціальну ситуацію в регіоні їх розташування. Вони постійно контактують з водою, солоною або прісною, яка знаходиться у спокої або русі і чинить на ГТС механічні, фізико-хімічні та біологічні дії.

ГЕС і ГАЕС відіграють важливу роль в роботі об'єднаної енергетичної системи України. Серед всіх гідроенергетичних об'єктів України найбільше значення має Дніпровський каскад ГЕС. Водосховища Дніпровського каскаду забезпечують комунально-побутові, промислові і сільськогосподарські потреби більш ніж половини території України. Важко переоцінити роль Дніпровського каскаду ГЕС у забезпеченні надійної роботи енергетичної системи країни, охорони навколишнього природного середовища та здоров'я людей, що проживають в долині річки Дніпро. Загальний виробіток електроенергії гідроелектростанціями Дніпровського каскаду становить до 90 % виробітку всіх ГЕС України. Тому питанням надійності і безпеки ГТС, а також надійної і безпечної експлуатації гідровузлів Дніпровського каскаду, розробки і удосконаленню методів оцінки їх надійності і

безпеки, а також охорони навколишнього природного середовища та здоров'я людей приділяється значна увага (Фаренюк та ін., 2019; Фаренюк та ін., 2020).

Під час будівництва Дніпровської ГЕС-2 в 1970-х роках конструкція автодорожнього переїзду по греблі Дніпровської ГЕС була значно змінена для забезпечення нормативних показників в частині пропускної спроможності автодорожнього переїзду (мосту) і несучої здатності його конструкцій. В теперішній час автодорожній переїзд потребує реконструкції для забезпечення довготривалої та надійної експлуатації споруд, тому виникла потреба перевірки технічного стану опор мосту над греблею та водозливної поверхні бетонної греблі. Це пов'язано також з тим, що міст розташований на консолях, що спираються на опори, які були зведені в 1932 році і пережили часткове руйнування від вибухів у період Другої світової війни в 1941 та 1943 роках та відновлення. Бетонні конструкції греблі Дніпровської ГЕС знаходяться в експлуатації майже 100 років, що відповідає нормативному граничному терміну їх експлуатації згідно з (ДБН В.2.4-3, 2010), та потребують перевірки їх технічного стану.

Дослідження технічного стану опор мосту показали, що міцність бетону з часом суттєво не зменшилася, незважаючи на те, що бетон знаходився тривалий час під впливом кліматичних чинників, а це свідчить про можливість бетонних конструкцій виконувати свої функції після реконструкції та ремонтних робіт по їх відновленню.

За результатами порівняння отриманих даних з даними обстежень, виконаних в попередні роки, стан всіх опор мосту та водозливної греблі погіршився, що проявилось в збільшенні кількості тріщин, ділянок корозії бетону та арматури. Відзначено, що експлуатація опор мосту може продовжуватися, проте потрібно виконати їх ремонт в складі ре-конструкції всіх бетонних ГТС Дніпровської ГЕС.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботах (Фаренюк та ін., 2019; Фаренюк та ін., 2020)

нюк та ін., 2020) в галузі гідротехніки висвітлюються питання надійності та безпеки гідротехнічних споруд в умовах їх тривалої експлуатації в складі каскаду ГЕС. Важливою задачею гідроенергетики України є дотримання безпеки та надійності ГТС Дніпровського каскаду ГЕС з врахуванням особливостей їх роботи та технічного стану з врахуванням руйнувань Дніпровської ГЕС, знищення Каховської ГЕС та надання шкоди екології прилеглої території.

МЕТА РОБОТИ

Оцінка працездатності ГЕС та ГТС Дніпровського каскаду в наслідок їх руйнувань під час війни та технічного стану бетону опор мосту та водозливної греблі Дніпровської ГЕС, одного із головних гідроенергетичних об'єктів України, що дозволить забезпечити їх подальшу надійну і безпечну роботу, а також можливість реконструкції автодорожнього мосту при забезпеченні охорони навколишнього природного середовища.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Матеріали та методи

При проведенні оцінки технічного стану опор автодорожнього переїзду та бетонної водозливної греблі Дніпровської ГЕС використовували візуальні обстеження та інструментальні дослідження стану бетону биків та водозливної греблі, що знаходяться тривалий час під впливом атмосферних чинників.

При проведенні візуальних обстежень стану бетону були виконана фотофіксація дефектів та пошкоджень бетону опор мосту та водозливної поверхні греблі та визначені місця розташування тріщин, сколів, вилугування бетону, площі їх розповсюдження.

При проведенні інструментальних досліджень стану бетону були використані наступні випробувальне обладнання, засоби вимірювальної техніки і реактиви: штангенциркуль; рулетка електронна; прес гідравлічний; установка алмазного буріння

Eibenstock з коронкою Ø 102 мм; перфоратор акумуляторний АЕГ з коронкою Ø 40 мм; ручний насос для продування від бетонного пилу; розчин фенолфталеїну; станок розпилювальний для бетону Cedima.

Загальна характеристика Дніпровського каскаду ГЕС та ГАЕС

Основу гідроенергетики України складає Дніпровський каскад ГЕС та ГАЕС (потужністю біля 4000 МВт) та Дністровський каскад ГЕС та ГАЕС (потужністю за проектом – 3035 МВт) (на сьогодні (з введеними 4-ма агрегатами ГАЕС) – 2063 МВт) та діючі малі ГЕС (загальна потужність близько 100 МВт).

До складу Дніпровського каскаду ГЕС входять 93 гідроагрегати потужністю 3911,1 МВт в складі шести гідроелектростанцій: Київська ГЕС (20 гідроагрегатів потужністю 412 МВт), Канівська ГЕС (24 гідроагрегати потужністю 451 МВт), Кременчуцька ГЕС (12 гідроагрегатів потужністю 625 МВт), Середньодніпровська ГЕС (8 гідроагрегатів потужністю 360,8 МВт), Дніпровська ГЕС-1 та ГЕС-2 (9+8 гідроагрегатів потужністю 1503,6 МВт) та Каховська ГЕС (6 гідроагрегатів потужністю 323,2 МВт, а також Київська ГАЕС (6 гідроагрегатів потужністю 235,5 МВт) [1, 2].

Гідровузли Дніпровського каскаду ГЕС та ГАЕС відносяться до об'єктів підвищеного класу наслідків (відповідальності) ССЗ. Аварії на цих потенційно небезпечних об'єктах мають багатофакторний вплив на природне середовище, на життя людини та її господарську діяльність. Тому надійність і безпека, охорона навколишнього природного середовища цих гідровузлів повинні бути забезпечені на період експлуатації, а також при ремонті, реконструкції, консервації та ліквідації.

Саме ГЕС із крупними водосховищами комплексного призначення виконують задачі регулювання річкового стоку, утворюють водогосподарські комплекси. Це призводить до прискорення розвитку оточуючої інфраструктури й зростання економіки України.

Будівництво ГЕС Дніпровського каскаду дозволило забезпечити вироблення екологічно чистої пікової електроенергії, що створює сприятливі умови роботи енергосистеми України. Реконструкція ГЕС Дніпровського каскаду дозволить підвищити безпеку основних споруд ГЕС каскаду, а

також підвищити енергетичні характеристики. В результаті виконання реконструкції I та II черги сумарна встановлена потужність ГЕС Дніпровського каскаду буде підвищена на 554,5 МВт в генераторному режимі. Енергетичні характеристики ГЕС Дніпровського каскаду наведені в Табл. 1.

Таблиця 1 – Енергетичні характеристики ГЕС Дніпровського каскаду

Table 1 – Energy characteristics of the Dnieper Cascade HPP

ГЕС	Кількість агрегатів	Встановлена потужність, МВт	Середнє багаторічне вироблення електроенергії, млн кВт·год / рік
Київська	20	440	709
Канівська	24	528	945
Кременчуцька	12	682,8	1516
Средньодніпровська	8	387	1232
Дніпровська ГЕС-1	9	648	1634
Дніпровська ГЕС-2	8	900	2271
Каховська	6	334,8	1295

Каховська ГЕС була повністю зруйнована російськими окупантами внаслідок вибуху 06.06.2023 року і на сьогодні не експлуатується. Атаки росіян по гідроенергетичній системі України відбувались неодноразово: Дніпровські ГЕС-1 та ГЕС-2 зазнали ракетних ударів по конструкціях ГТС 31.10.2022 року, 16.12.2022 року, 15.03.2023 року, 22.03.2024 року приведено на Рис. 1 та 01.06.2024 року.

Водні ресурси водосховищ Дніпровського каскаду призначені для комплексного використання: для гідроенергетики, комунального і промислового водопостачання, зрошування і зволоження земель, водного транспорту, рибного господарства, рекреації.

Експлуатація ГТС, що входять до складу гідровузлів Дніпровського та Дністровського каскадів ГЕС та ГАЕС, охорона навколишнього природного середовища здійснюються власником цих гідровузлів – ПрАТ «Укргідроенерго». Для підвищення оперативності та достовірності контролю за станом безпеки та надійності ГТС Дніпровського та Дністровського каскадів (напружено-деформованим станом бетону, осі-

данними споруд та основи, п'єзометричним рівнем води та фільтраційними витратами в тілі, основі та в примиканнях до берегів земляних гребель тощо) вони оснащені автоматизованими системами контролю (далі – АСК). Надійність та безпека ГТС цих гідровузлів забезпечують-ся на основі оцінки їх технічного стану шляхом аналізу та узагальнення даних натурних візуальних та інструментальних досліджень на основі АСК та системи моніторингу просторових зміщень споруд, проведенням комплексних досліджень поточного стану гідротехнічних споруд.

Стан Каховської ГЕС, що зазнала критичних руйнувань під час війни

6 червня близько 02:50 2023 року російські окупанти вдалися до чергового акту екоциду, котрий призвів до безпрецедентних екологічних наслідків для півдня України і цілого Чорноморського регіону. Наслідки руйнування Каховської ГЕС наведені на рисунку 1.

Знищення дамби Каховської ГЕС стало однією з найбільших техногенних катастроф Європи. У зоні лиха опинилося близько 16 000 людей, та близько 80 населених

пунктів затоплених внаслідок теракту. Наслідками злочинного руйнування Каховської ГЕС, крім недоотримання електричної енергії, є:

- знищення та значне порушення екосистем Каховського водосховища та притоки Дніпра, на яких відбувався підпір води, низов'я Дніпра, Дніпровського лиману і

порушення екосистем пригирлової ділянки Чорного моря;

- масова загибель водних організмів (риби, молюсків, ракоподібних, мікроорганізмів, водної рослинності) з подальшим погіршенням якості води внаслідок розкладення загинувших організмів;



Рис. 1. Каховської ГЕС до та після руйнування (Maxar Technologies, 2023)

Fig. 1. Kakhovka HPP before and after destruction (Maxar Technologies, 2023)

- порушення середовища існування риби, молюсків, ракоподібних, птахів, земноводних та інших тварин, які заселяють акваторію та прибережні комплекси і нижче за течією до Кінбурнського півострова;

- порушення середовища існування та можлива загибель тварин, популяцій гризунів, занесених до Червоної книги України;

- порушення середовищ існування рослинних комплексів (прибережна водна рослинність), степових та лісових комплексів (низов'я Дніпра, де зростають ендемічні види, занесені до Світового червоного списку, які більше ніде в світі не зустрічаються);

- непрогнозоване відкладання наносів та змитих ґрунтів з поверхні суходолу;

- негативний вплив на акваторії, прибережні території та сухопутну частину трьох українських національних природних пар-

ків – «Нижньодніпровський», «Кам'янська Січ», «Білобережжя Святослава», Чорноморський біосферний заповідник (ця територія також має статус біосферного резервату ЮНЕСКО), Регіонального ландшафтного парку «Кінбурнська Коса» та численних об'єктів природно-заповідного фонду з меншими площами, вплив на проєктовані природоохоронні території;

- порушення водопостачання об'єктів у Херсонській і, частково, Запорізькій та Дніпропетровській областях;

- забруднення вод Дніпра і Чорного моря (потрапляння до вод паливно-мастильних матеріалів, змив сміття, агрохімікатів, інших небезпечних матеріалів, затоплення і виведення з ладу систем очистки стічних вод, каналізації, порушення шарів намулу, в яких десятиліттями відбувалось накопичення забруднюючих речовин);

- затоплення будинків, споруд, підприємств, втрати майна, руйнування;
 - знищення свійських тварин, худоби, домашніх тварин, тварин у зоопарках, що призведе до отруєння води, ґрунтів, повітря та становити небезпеку поширення інфекційних хвороб;
 - ускладнення або повне унеможливлення водопостачання для сільськогосподарських потреб півдня Херсонської області;
 - вимивання, перенесення мін та інших вибухонебезпечних речовин, збільшення мінної небезпеки;
 - ускладнення або унеможливлення відбору води, необхідної для охолодження Запорізької АЕС, загроза ядерній безпеці світу;
 - зміна мезоклімату території через зміну площі водного дзеркала, зміна водного балансу території та збільшення відкритих ділянок суші;
 - неможливість регулювання водного режиму під час паводків, ризику повторного підтоплення територій, які були залежними від регулювання з боку Каховської ГЕС.
- Відновлення екосистем – це реально, але для цього потрібен час та гроші. За попередніми підрахунками, для відновлення Каховської ГЕС потрібно щонайменше п'ять років та від 1 до 2 млрд євро.

Загальна характеристика та сучасний стан Дніпровської ГЕС

Термін будівництва комплексу: ГЕС-1 – 1927...1932 роки, ГЕС-2 – 1970...1980 роки. Встановлена потужність – 1503,6 МВт.

ДніпроГЕС-1 та ДніпроГЕС-2 входять до складу гідровузлів Дніпровського каскаду, ведуть добове і тижневе регулювання, приймають участь в покритті піку добового графіка навантажень енергосистеми України.

До складу основних гідротехнічних споруд Дніпровського гідровузла входять:

- водозливна гребля;
- щитові стінки ГЕС-1 та ГЕС-2;
- будівлі ГЕС-1 та ГЕС-2 з монтажними майданчиками;
- спрягаючі споруди;

- однокамерний і трикамерний судноплавні шлюзи;

- глухі бетонні греблі біля лівого та правого берегів.

У загальній компоновці основних споруд: ГЕС-1 розташована на правому березі Дніпра, ГЕС-2 та судноплавні шлюзи – на лівому березі.

Ґрунтовою основою споруд Дніпровської ГЕС є кристалічні породи, представлені, в основному, гранітами (рідше гранітогнейсами), слабо вивітрілими, які іноді мають підвищену тріщинуватість. Покрівля їх має вельми нерівну поверхню з перепадами відміток від мінус 12,00 м до +15,00 м.

Основні особливості компоновки та конструкції Дніпровської ГЕС:

ГЕС-1: будівля прямолінійна в плані, розбита температурно-осадовими швами на блоки довжиною 22 м, з верхової сторони приєднується до щитової стінки. Надводна частина з закритим машинним залом.

ГЕС-2: будівля криволінійна в плані, паралельно окресленню водозливної греблі, напірні залізобетонні водоводи розташовані на водозливній поверхні греблі. План розташування автодороги через водозливну греблю Дніпровську ГЕС наведено на Рис. 2.

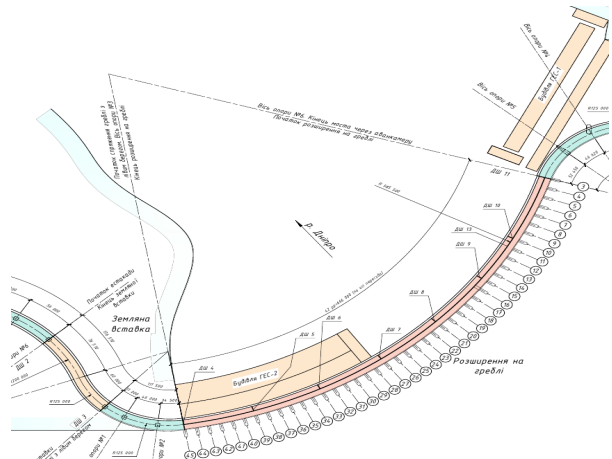


Рис. 2. План розташування автодорожнього переїзду (мосту) через водозливну греблю Дніпровської ГЕС

Fig. 2. Location plan of the road crossing (bridge) across the spillway dam of the Dnieper HPP

Слід ще раз відзначити, що Дніпровська ГЕС зазнавала часткових руйнувань в період Другої світової війни. Види на водозли-

вну греблю Дніпровську ГЕС після вибухів у 1941 р. та опори мосту наведені на рисунку 3.

Під час збройної агресії російської федерації були зафіксовані ракетні попадання у конструкції будівель ГЕС-1, ГЕС-2, трансформаторну підстанцію, опори та мостовий перехід, що призвело до призупинення роботи гідроелектростанцій ГЕС-1 та ГЕС-2.

Наслідки влучань по Дніпровській ГЕС наведені на Рис. 4.

Доведеться відновлювати машинний зал Дніпровської ГЕС-1 та ГЕС-2, електричне обладнання. Деякий час ГЕС-2 зможе працювати в обмеженому режимі. На повне відновлення потрібен значний час.



Рис. 3. Види на водозливну греблю Дніпровської ГЕС після вибухів у 1941 р. та бики № 22-25, підірвані з вертикальних вентиляційних шахт (з боку нижнього б'єфу) (memorua.org, 1941)

Fig. 3. Views of the spillway dam of the Dnieper HPP after the explosions in 1941 and bulls No.22-25, blown up from vertical ventilation shafts (from the downstream side) (memorua.org, 1941)

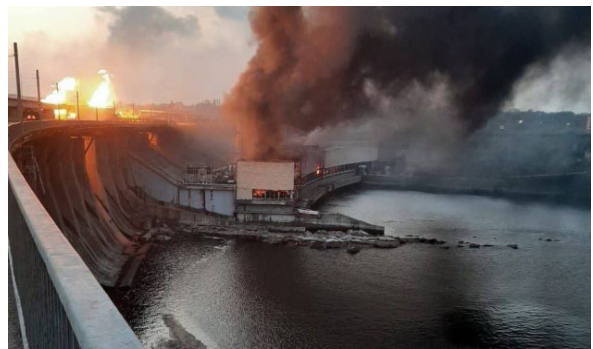


Рис. 4. Наслідки влучань по Дніпровській ГЕС 22.03.2024 р. з витоком нафтопродуктів (top.today.ua, 2023)

Fig. 4. Consequences of the Dnieper HPP impacts on March 22, 2024 with the leakage of petroleum products (top.today.ua, 2023)

Характеристика бетонної водозливної гравітаційної греблі

Ґрунти основи водозливної греблі – гранітогнейси, граніти. Відмітка гребня – 54,80 м, максимальний напір – 38,7 м, будівельна висота – 62,0 м, довжина по гребню – 760,5 м. В плані гребля має форму дуги радіусом 600 м (рисунок 5), ширина по гребню – 2,8 м, ширина по підшві – 39,7 м. Водозливний фронт складає 47 отворів шириною 13 м кожний. З них 25 отворів використовуються для пропуску повені, 16 для водозабору ГЕС – 2, 4 (забетоновані) і на ГЕС-1 2 шт., один (№ 29) – не використовується згідно з проектом у зв'язку з можливим затопленням машинного залу ГЕС-2. Відмітка порогу водозливу – 41,65 м. Кількість водозливних отворів і їх основні розміри: 25 отворів шириною 13 м і напором на водозливі 9,75 м. Сумарні розрахункові витрати води через водозливні отвори: при нормальному підпірному рівні (далі – НПР) – 21300 м³/с.

В тілі греблі є дві потерни на відмітках +14,400 м і +29,900 м. За водобій слугує

скельний ґрунт річки. Протифільтраційні пристрої: цементаційна завіса в основі глибиною до 30 м. Дренажні пристрої: свердловини діаметром 100...150 мм в тілі греблі на відстані 6,6 м; свердловини в основі греблі діаметром 100...150 мм глибиною 4,0 м.

Об'єкти розташовані у примиканні – бетонний стоян зі сторони правого берегу, скельна основа зі сторони лівого берегу.

З історичних джерел відомо, що водозливна гребля зазнавала підриву у 1941 році, коли було зруйновано верхню її частину приблизно від 13 до 21 опори (рисунк 4), а також руйнівного вибуху у 1943 році, коли було зруйновано верхню частину опор №№ 1, 2, 4, 6, 7, 16-18, 22-25, 36-44, інші опори мали дефекти від вибуху. Детально утворені дефекти від вибухів описані у (Логінов, 1947).

По гідротехнічних спорудах Дніпровської ГЕС проходить автодорожній переїзд

(міст), що пов'язує правий та лівий береги р. Дніпро (рисунк 5).

У верхніх частинах опор під автомобільним проїздом по греблі укладався бетон в 1999-2000 роках (так звана «набетонка»).

Таким чином, бетон греблі можна розділити на такі основні частини (зони):

- бетон укладений в 1929-1932 роках (основна частина споруди);

- бетон укладений при ремонті в 1942 році після вибухів в 1941 році (верхня частина дамби від 13 до 21 опори);

- бетон укладений при ремонті в 1944-1947 роках після вибухів в 1943 році (верхня частина дамби в биках №№ 1, 2, 4, 6, 7, 16-18, 22-25, 36-44);

- «набетонка» у верхній частині опор (виконана в 1999-2000 роках).



Рис. 5. Загальні види на автомобільний переїзд та водозливну греблю Дніпровської ГЕС з лівого берега (з боку нижнього б'єфу)

Fig. 5. General views of the road crossing and spillway dam of the Dnieper HPP from the left bank (from the downstream side)

У 1974 р. розпочато реконструкцію автодорожнього переїзду через греблю, аванкамеру і шлюзи, яка була закінчена в 1977 р.

Автодорожній переїзд по спорудах Дніпровської ГЕС складається з комплексу нижчеперелічених споруд:

- 1 Естакада через шлюзи довжиною 352,0 м;

- 2 Естакада сполучення греблі з лівим берегом довжиною 111,5 м;

- 3 Автомобільний переїзд по греблі довжиною 666,0 м;

- 4 Міст через аванкамеру довжиною 319,75 м;

- 5 Земляна вставка довжиною 136,6 м.

Загальна довжина автодорожнього переїзду 1585,9 м.

У 2005 році були проведені локальні дослідження фізико-механічних характеристик бетону, вибуреного в місці контакту бетон-скеля водозливної греблі. Вибурю-

вання проводилось із потерни. За результатами випробувань зразків було визначено, що міцність бетону орієнтовно коливається від 33 до 60 МПа.

Також були виконані випробування міцності бетонних зразків виготовлених із бетонних конструкцій греблі. Дослідженнями фізико-механічних характеристик бетону та параметрів його корозійного стану встановлено, що середня міцність бетону на стиск в основному коливається від 24 до 480 МПа, що відповідає класу бетону за міцністю від С12/15 до С30/35.

Результати візуальних обстежень та інструментальних досліджень технічного стану биків і поверхні водозливної греблі у 2021 році

Візуальні обстеження

Візуальні обстеження та інструментальні дослідження технічного стану опор мосту і по-верхні водозливної греблі Дніпровської ГЕС були виконані ДП НДІБК у 2021 році. Обстеження проводилися з визначенням характеру та параметрів їх пошкоджень, фотофіксацією дефектів та пошкоджень. Візуальні обстеження верхніх частин поверхні всіх биків та водозливних поверхонь греблі проводилися з пішохідних підмостків та тротуару автодороги шляхом фотофіксації їх недоліків та пошкоджень приведені на Рис. 6. Візуальні обстеження нижніх частин всіх опор та водозливних поверхонь греблі проводилися з човна з боку нижнього б'єфу шляхом фотофіксації недоліків та пошкоджень. При обстеженні розкриття оздоблювального шару конструкцій не виконувалося.

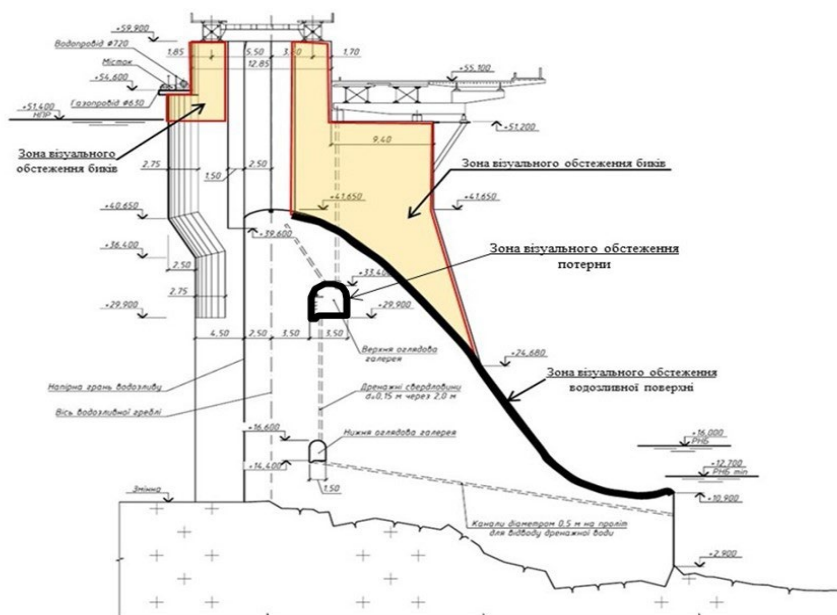


Рис. 6. Зони візуального обстеження биків та водозливної поверхні греблі

Fig. 6. Visual inspection areas of the dam and spillway

При обстеженні бетону опор з боку верхнього показано на Рис. 7) та нижнього Рис. 8) б'єфів, верхньої потерни Рис. 9) та поверхні водозливної греблі Рис. 10) зафіксовано такі дефекти та пошкодження:

- окремі тріщини та сітки тріщин шириною розкриття 0,1...20 мм в бетоні;
- сітки тріщин шириною розкриття 0,1...10 мм в оздобленні;

- руйнування захисного шару бетону та сколи бетону;
- недостатній захисний шар бетону, неякісне бетонування;
- оголення та корозія арматури;
- руйнування, відшарування оздоблювального шару;
- сліди замокання, висоли;
- площинне руйнування бетону поверхні водозливу на глибину до 3,0 см;

- локальні руйнування бетону поверхні водозливу на глибину до 10 см;
- сліди замокання, проростання рослинності на поверхні водозливу;

- фільтрація води крізь шви бетонування на водозливі;
- розкриття швів між блоками бетонування водозливу.



Рис. 7. Руйнування захисного шару бетону, оголення та корозія арматури, сколи, висоли, тріщини (відповідно опори №№ 10, 11, 12 з боку верхнього б'єфу)

Fig. 7. Destruction of the protective layer of concrete, exposure and corrosion of reinforcement, chips, efflorescence, cracks (respectively, supports No. 10, 11, 12 from the upper beam side)



Рис. 8. Руйнування захисного шару бетону, тріщини шириною розкриття до 5 мм, висоли, неякісне бетонування, фільтрація (опори №№ 46, 47, 48 з боку нижнього б'єфу)

Fig. 8. Destruction of the protective layer of concrete, cracks with an opening width of up to 5 mm, efflorescence, poor-quality concreting, filtration (supports No. 46, 47, 48 from the lower side of the embankment)

Виявлені пошкодження виникли внаслідок зовнішнього впливу (фізико-механічних та динамічних дій води), погодно-кліматичних факторів, недостатньо

якісного виконання будівельно-монтажних робіт під час відновлення греблі у 1947 році та відсутності своєчасних ремонтів.



Рис. 9. Руйнування бетону потерни, оголення та пластинчаста корозія арматури, сліди замочання
Fig. 9. Destruction of concrete, abrasion, exposure and lamellar corrosion of reinforcement, traces of soaking



Рис. 10. Загальний вид водозливної поверхні між опорами № 3 і № 4. Руйнування бетону, оголення та корозія арматури, сколи бетону опор №№ 18, 21
Fig. 10. General view of the spillway surface between supports No. 3 and No. 4. Destruction of concrete, exposure and corrosion of reinforcement, concrete chips of supports No. 18, 21

Аналіз результатів візуальних обстежень дозволяє зробити наступні висновки:

- у порівнянні з результатами обстежень, виконаними в 2008 та 2017 роках, стан всіх опор водозливної греблі погіршився, що проявилось в збільшенні кількості тріщин, ділянок корозії бетону та арматури і прогресуючого розвитку блочної структури;

- експлуатація опор може продовжуватися, проте потрібне виконання попереджувального ремонту, що передбачає віднов-

лення захисного шару бетону опор і ліквідацію тріщин (тампонування ремонтними сумішами).

Оцінка технічного стану биків та водозливної греблі проводилася у відповідності з ДСТУ-Н Б В.1.2-18 «Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану» (ДСТУ-Н Б В.1.2-18, 2016). Загальний технічний стан бетонних конструкцій опор мосту та поверхні водозливної греблі Дніпровської гідро-

електростанції охарактеризований як задовільний, що дозволяє виконувати подальшу експлуатацію споруд.

Інструментальні дослідження

Дослідження проводилися шляхом вибурування кернів з бетонних поверхонь в місцях, доступних до вибурування. Місця вибурування кернів вибиралися з урахуванням історії виконання бетонних робіт при будівництві і відновленні Дніпровської ГЕС після руйнувань в період Другої світової війни, а також дотримання техніки безпеки і узгоджувалися з представниками експлуатуючої організації.

Для визначення ступеня карбонізації бетону вирізалися керни Ø 40 мм, які досліджувалися на місці хімічним методом. Місця проведення інструментальних досліджень (місця вибурування кернів) намічались після проведення та попереднього аналізу результатів візуальних обстежень. Для визначення міцності бетону з тіла конструкцій вибурувалися керни діаметром 100 мм, що випробовувалися на стиск в лабораторних умовах в

ДП НДІБК (рисунок 11). Керни вибурувалися за допомогою установки для вибурування на штативі та алмазної коронки. Установка дозволяла здійснювати вибурування зразків як у вертикальному положенні, так в горизонтальному, а також під кутом.

Карбонізація бетону

Визначення глибини карбонізації бетону виконувалось в місцях, наведених на Рис. 11. Визначення корозійних пошкоджень (глибини карбонізації) бетону здійснювалось шляхом вибурування зразка-керну, використовуючи ударну коронку (діаметр коронки 40 мм) (СОУ ДП НДІБК В.2.6-02495431-003, 2020). За допомогою перфоратора вирізалися керни діаметром Ø 40 мм і довжиною 30-50 мм в кількості 5 кернів на 1 зону – всього 10 зон наведено на Рис. 11. Після вилучення керну, його поверхню та місце вибурування ретельно очищали від утвореного пилу, продуваючи повітрям.

Для визначення глибини карбонізації бе-

тону застосовувався розчин фенолфталеїну, який наносився на місце вибурування. Через декілька секунд після нанесення розчину фенолфталеїну оцінювалась глибина карбонізації бетону конструкції за малиновим забарвленням розчину фенолфталеїну при його взаємодії з лужним середовищем бетону. В місцях де реакція не відбувалась фенолфталеїн не змінює свій колір на малиновий, що свідчить про карбонізацію бетону. Глибина карбонізації бетону вимірювалась штангенциркулем з точністю до 1 мм.

Карбонізація бетону є одним з видів корозії бетону, який приводить до зміни його фізико-механічних характеристик і корозії арматури.

Найнебезпечніші пошкодження залізо-бетонних конструкцій в агресивних середовищах пов'язані, як правило, з корозією арматури внаслідок недостатньої товщини та щільності захисного шару бетону. Тривалість дії захисних властивостей бетону відносно арматури у вологій атмосфері визначається кінетикою його нейтралізації кислими газами і залежить від товщини захисного шару бетону, реакційної ємності відносно кислого газу і дифузійної проникності бетону. Слід контролювати глибину карбонізації бетону, щоб вона не була більше за товщину захисного шару бетону для уникнення корозії арматури.

Спостереження за бетонними та залізо-бетонними спорудами показують, що вже через декілька місяців твердіння бетону на повітрі при підвищеній вологості карбонізований шар на конструкціях стає завтовшки в кілька міліметрів (Бліхарський, та ін., 2007). Збільшення товщини карбонізованого шару при підвищеній вологості пояснюється тим, що вода має каталізуючий вплив на процес карбонізації. Карбонізація може проходити лише за наявності певної кількості вологості в порах бетону (не менш 0,5...1,0 % загальної маси). В частинах споруд, які знаходяться під постійною дією води із вмістом агресивної вуглекислоти, карбонізований шар має незначну товщину. Це пояснюється перш за все руйнуванням карбонізованого шару на зовнішній повер-

хні під дією вуглекислоти внаслідок його вимивання водою, а також утворенням щільного карбонатного шару.

Глибину карбонізації бетону водозливної греблі визначали у п'яти поруч розташованих точках. Проведені дослідження

показали, що середні показники глибини карбонізації бетону биків з боку нижнього б'єфу зменшується, бетону у потерні збільшується у напрямку від правого берега до лівого показано на Рис. 12.

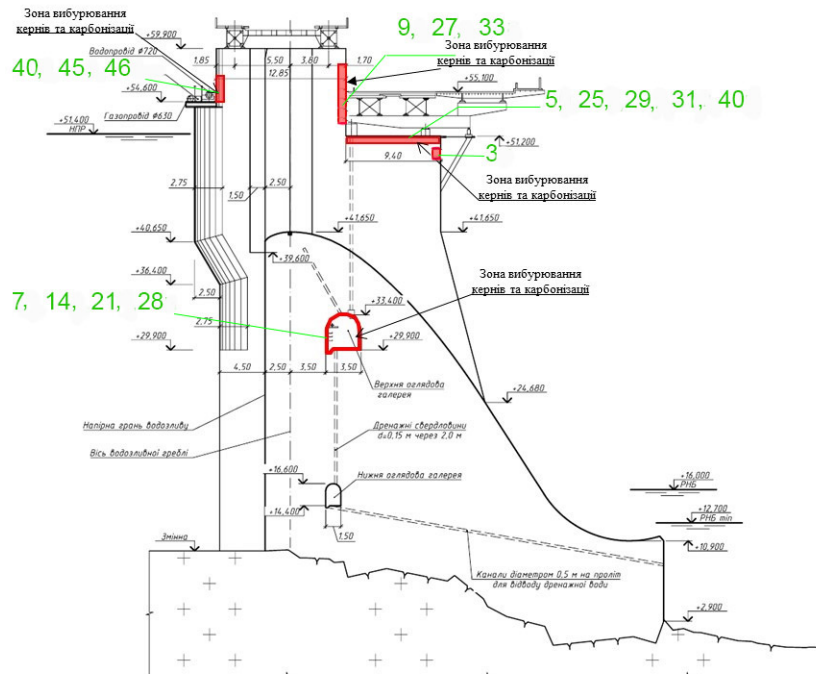


Рис. 11. Зони відбору кернів та номери опор, в яких проводилось вибурування
Fig. 11. Core sampling areas and pier numbers where drilling was carried out

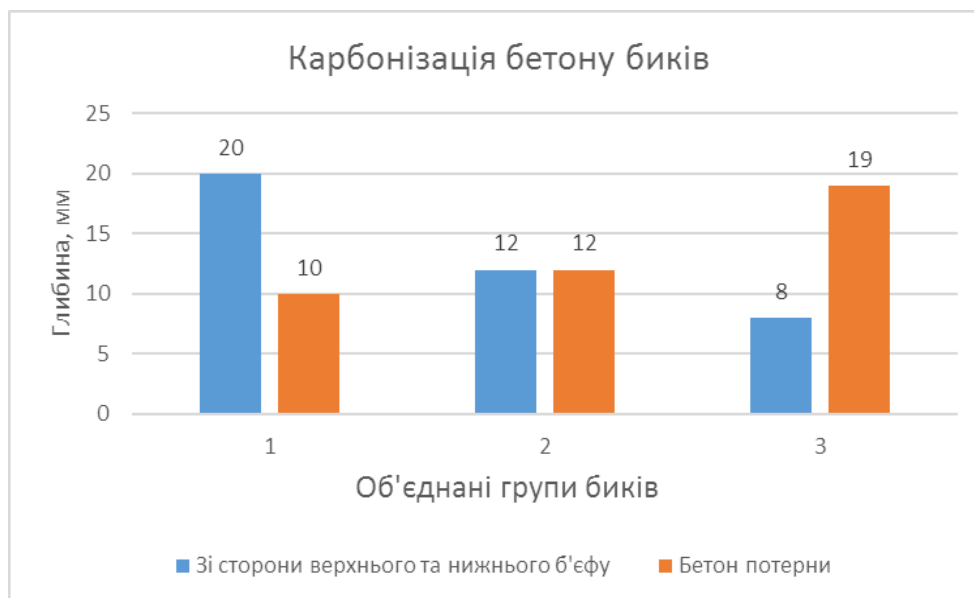


Рис. 12. Середні значення глибини карбонізації бетону биків по довжині водозливної греблі (на рисунку об'єднані групи опор: № 1 – опори №№ 1-18; № 2 – опори №№ 19-35; № 3 – опори №№ 35-49)

Fig. 12. Average values of the carbonation depth of the concrete of the bulls along the length of the spillway dam (the figure shows the combined groups of supports: No. 1 – supports No. 1-18; No. 2 – supports No. 19-35; No. 3 – supports No. 35-49)

Найбільші значення глибини карбонізації бетону виявлені на опорі № 5, де середнє значення становило 20 мм, а максимальне - 45 мм. По довжині водозливної греблі глибини карбонізації бетону знаходиться в межах від 8 мм (опора № 50) до 15 мм (опора № 40). Від опори № 40 і до краю греблі глибина карбонізації бетону знаходиться в межах від 3 до 13 мм.

У потерні глибина карбонізації бетону збільшується від 10 мм (опора № 7) до 19 мм (опора № 28). Максимальні значення виявлені на опорах № 21 і № 28 – 32 мм і 30 мм, відповідно. Стінка потерні з боку верхнього б'єфу має досить рясні утворення висолів на поверхні бетону. В цих місцях тест на карбонізацію спочатку буде завжди показувати позитивний результат, оскільки сполуки кальцію (гідрокарбонати) вимиваються з тіла бетону на поверхню і індикатор реагує на лужне середовище. Бетон в таких місцях поступово втрачає свої характеристики та захисні властивості.

Визначення глибини карбонізації «набетонки» показало, що значення знаходяться у межах від 1 до 15 мм і відрізняються між собою по всій довжині водозливної греблі.

Значних відмінностей по відношенню до глибини карбонізації для різних видів основного бетону, що був укладений в різні

роки, не виявлено.

Наявна на листопад 2021 р. глибина карбонізації бетону опор (10...45 мм) не є критичною, оскільки захисний шар має бути не менше 50 мм. Однак достовірно невідома глибина закладання металевої арматури в бетоні опор, що пов'язано з відсутністю матеріалів щодо товщини захисного шару при відновлювальних роботах по бетонуванню опор після вибухів 1941 та 1943 років (Збірник статей, с. 11...22). Прогнозування строків безпечної експлуатації конструкцій без створення передумов для уникнення корозії арматури внаслідок поширення карбонізації буде виконуватись в подальшому.

Фізико-механічні дослідження

Для визначення міцності бетону з тіла конструкцій були вибурені керни довжиною від 350 мм до 400 мм. З кожного вибуреного керна, відповідно до ДСТУ Б В.2.7-223, виготовлено по три зразки. Визначення міцності виконували згідно з ДСТУ Б В.2.7-223 та ДСТУ Б В.2.7-214.

Зміни міцності бетону на різних ділянках опор водозливної греблі наведено на Рис. 13.

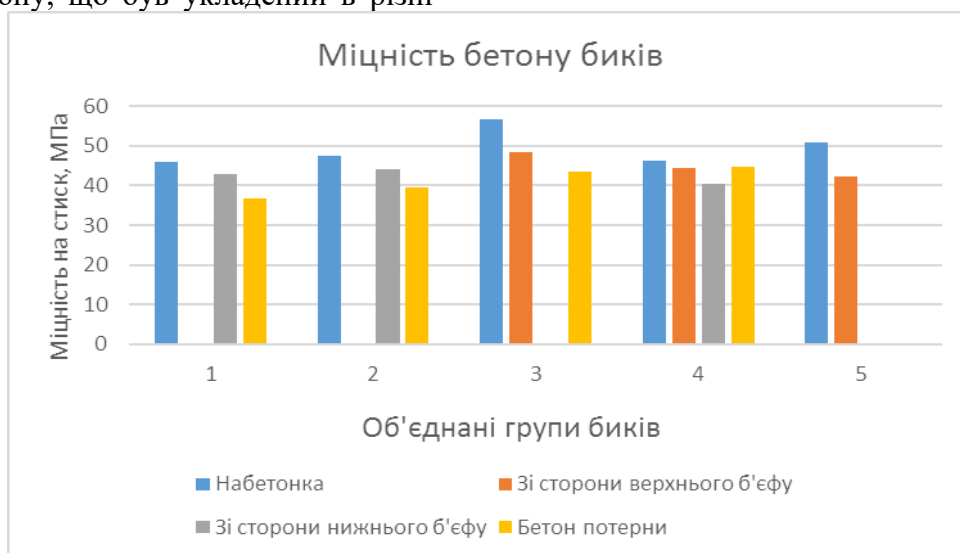


Рис. 13. Середні значення міцності бетону на стиск по довжині водозливної греблі. Об'єднані групи опор: № 1 – опори № 1-10; № 2 – опори № 11-20; № 3 – опори № 21-30; № 4 – опори № 31-40; № 5 – опори № 41-49

Fig. 13. Average values of compressive strength of concrete along the length of the spillway dam. Combined groups of supports: No. 1 – supports No. 1-10; No. 2 – supports No. 11-20; No. 3 – supports No. 21-30; No. 4 – supports No. 31-40; No. 5 – supports No. 41-49

Результати лабораторних досліджень кернів показали, що міцність бетону на стиск становить 42,7...62,1 МПа (клас С30/35...С32/40) для «набетонки» (опори №№ 5, 25, 29, 31, 40); 37,7...47,7 МПа (клас С20/25...С25/30) для бетону в потерні (опори №№ 7, 14, 21, 28); 33,3...51,1 МПа (клас С25/30...С30/35) для бетону опор з боку верхнього б'єфу (опори №№ 9, 27, 33, 40, 45, 46).

Верхню частину опори № 40 було заново відновлено після вибуху 1943 року (Збірник статей), тому бетон нижньої частини опори, не маючи дефектів від вибуху, має найвищі показники міцності серед «старого» бетону – до 51,1 МПа та відрізняється за кольором від бетону, укладеного під час будівництва.

Таким чином, міцність бетону в порівнянні із раніше встановленими значеннями не знизилася, незважаючи на те, що він знаходиться тривалий час під впливом атмосферних чинників, а це свідчить про можливість опор виконувати функції після реконструкції та ремонтних робіт по відновленню стану пошкоджених ділянок.

З урахуванням результатів виконаного натурального обстеження, а також результатів інструментальних та лабораторних випробувань, технічний стан бетону опор мосту, згідно з ДСТУ-Н Б В.1.2-18 оцінений як задовільний.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. За результатами порівняння з даними обстежень, виконаних в 2008 та 2017 роках, стан всіх опор водозливної греблі дещо погіршився, що проявилось в збільшенні кількості тріщин, ділянок корозії бетону та арматури і прогресуючого розвитку блочної структури.

2. Міцність бетону в порівнянні із раніше встановленими значеннями не знизилася, а це свідчить про можливість конструкцій виконувати функції. Бетон опор, станом на листопад 2021 р., переважно має клас міцності С25/30. «Набетонка» під мостовими конструкціями має клас міцності переважно С30/35.

3. Наявна на листопад 2021 р. глибина карбонізації бетону опор (10...45 мм) не є

критичною, оскільки захисний шар має бути не менше 50 мм.

4. З урахуванням результатів виконаного натурального обстеження, а також даних інструментальних та лабораторних випробувань, технічний стан бетону опор мосту та поверхні водозливної греблі згідно з ДСТУ-Н Б В.1.2-18 оцінений як задовільний.

5. В цілому конструкції опор та водозливної греблі відповідають сучасним нормативним вимогам, але для забезпечення їх надійності та безпечної експлуатації необхідно провести відновлювані роботи.

6. При цьому слід провести перевірочні розрахунки конструкцій опор мосту, з врахуванням його реконструкції, згідно з чинними на час реконструкції будівельними нормами (ДБН В.2.4-3, 2010).

7. Результати досліджень мають бути враховані в проекті відновлення Дніпровської ГЕС, який буде розроблений після завершення війни.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фаренюк Г. Г., Вайнберг О. І., Хлапук М. М., & Шумінський В. Д. (2019) Надійність та безпека гідротехнічних споруд в умовах тривалої експлуатації. *Журнал «Наука та будівництво»* № 2 (20). ДП НДІБК, 4-18.
2. Фаренюк Г. Г., Вайнберг О. І., & Шумінський В. Д. (2020) Надійність та безпека гідротехнічних споруд Дніпровського та Дністровського каскадів ГЕС. *Журнал «Наука та будівництво»* № 3 (25). ДП НДІБК, 3-12.
3. Гідротехнічні споруди. Основні положення: ДБН В.2.4-3-2010 (2010). [Чинні від 2011-01-01]. К.: ДП «Укрархбудінформ».
4. ТСН. (2023). *Окупанти підірвали Каховську ГЕС: вода затоплює Херсонщину, які наслідки*. <https://tsn.ua/ato/rotskyi-okupanti-pidirvali-kahovsku-ges-2344243.html>
5. Радіо свобода. 2023. *У 1941 році було підірвано ДніпроГЕС, щоб зупинити німців. Скільки людей загинуло?* <https://www.radiosvoboda.org/a/pidryv-dniprohes-u-1941-rotsi/31415294.html>
6. Фокус. (2024). *"Шукаємо по сусідах": Україна потребує додаткові ЗРК для захисту*

енергетики <https://focus.ua/uk/voennye-novosti/638661-shukayemo-po-susidah-ukrajina-potrebuye-dodatkovy-zrk-dlya-zahistu-energetiki-galushchenko>

7. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану: ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 (2017). – К.: ДП «УкрНДНЦ».
8. Оцінка технічного стану залізобетонних конструкцій під час експлуатації в агресивних середовищах: СОУ ДП НДІБК В.2.6-02495431-003:2020 (2020) [Чинні від 2020-10-09]. К.: ДП НДІБК.
9. З.Я. Бліхарський, Р.Ф. Струк & Р.Є. Хміль Дослідження карбонізації бетону в залізобетонних конструкціях (2007). *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»* № 600: *Теорія і практика будівництва*. – 583 с.
10. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій: ДСТУ Б В.2.7-223:2009 (2010). – [Чинні від 2010-09-01]. – К.: Мінрегіонбуд.
11. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 (2010). – [Чинні від 2010-09-01]. К.: Мінрегіонбуд, 2010.

REFERENCES

1. Farenjuk G., Vaynberg O., Shuminskyi V. & Khlapak N. (2019) The reliability and safety of hydraulic engineering structures in conditions of long operation. *Journal «Science and construction»*. № 2 (20). SE NDIBK, 4-18 (in Ukrainian)
2. Farenjuk G., Vaynberg O. & Shuminskyi V. (2020) The reliability and safety of hydraulic engineering structures of the Dnieper and Dniester cascades of hydroelectric power plants. *Journal «Science and construction»* № 3 (25). SE NDIBK, 3-12
3. Hydraulic structures. Basic principles: DBN V.2.4-3:2010. (2010). [Effective from 2011-01-01]. Kyiv: SE «Ukrarkhbudinform» (in Ukrainian)
4. TSN. (2023). *The occupiers blew up the Kakhovka hydroelectric power station: water is flooding the Kherson region, which is close to us* <https://tsn.ua/ato/rotskyi-okupanti-pidirvali-kahovsku-ges-2344243.html>
5. Radio Svoboda. 2023. *In 1941, the Dnipro Hydroelectric Power Plant was blown up to*

stop the Germans. How many people died? <https://www.radiosvoboda.org/a/pidryv-dniprohes-u-1941-rotsi/31415294.html>

6. Focus. (2024). *"Looking for neighbors": Ukraine needs additional air defense systems to protect the energy sector* <https://focus.ua/uk/voennye-novosti/638661-shukayemo-po-susidah-ukrajina-potrebuye-dodatkovy-zrk-dlya-zahistu-energetiki-galushchenko>
7. Guidelines for the survey of buildings and structures to determine and assess their technical condition: DSTU-N B V.1.2-18:2016 (2017). – К.: SE «UkrNDSC» (in Ukrainian).
8. Assessment of the technical condition of reinforced concrete structures during operation in aggressive environments: SOU SE NDIBK V.2.6-02495431-003:2020 (2020) [Effective from 2020-10-09]. – К.: SE NDIBK (in Ukrainian).
9. Z.Y. Blikharsky, R.F. Struk & R.E. Khmil (2007) Research of concrete carbonization in reinforced concrete structures *Bulletin of the National University «Lviv Polytechnic»* № 600: *Theory and practice of construction*. – 583.
10. Building materials. Concrete. Methods for determining strength from samples taken from structures: DSTU B V. 2.7-223:2009 (2010). [effective from 2010-09-01]. К.: Minregionbud (in Ukrainian).
11. Building materials. Concrete. Methods for determining strength according to control samples: DSTU B V.2.7-214:2009 (2010). [Effective from 2010-09-01]. К.: Minregiondud (in Ukrainian).

The state of hydraulic structures of hydroelectric power plants of the Dnieper cascade at example of the Dnieper HPP

Yuriy SLYUSARENKO,
Volodymyr TYTARENKO,
Maksym MYKOLAIETS
Yaroslav DOMDROVSKYI,
Valeryi SHUMINSKYI.

Summary. The article reviews the research results of the concrete supports state of a road crossing and a concrete spillway dam of the Dnieper hydroelectric power station, which has been under the influence of natural and climatic factors for a

long time (since 1932). The depth of concrete carbonation of the bulls from the side of the upper and lower bivouacs and in the upper potern was determined. The assessment of concrete strength was carried out by drilling cores and testing them in laboratory conditions. Concrete and reinforced concrete dams are one of the most common types of hydraulic structures. They are a part of most hydraulic units. The reliable and safe operation of hydroelectric power plants depends on their condition, which significantly affects the economic, ecological and social situation in the region where they are located. Dams are built in various geological conditions. Their construction is characterized by high technology, complex mechanization of works. The facts regarding the explosion of two hydroelectric power plants (DniproHES in 1941 and 1943, Kakhovka HPP in 2023, and Dnipro HPP1 and HPP-2 in 2024) are presented and an analysis of the negative consequences of the criminal destruction of Kakhovka HPP is presented.

An important task of the Ukrainian hydropower industry is to ensure the safety and reliability of the operation of hydraulic structures and environmental protection. The reliability and safety of hydraulic structures, as well as environmental protection, must be ensured during operation, as well as during repair, reconstruction, conservation and liquidation. The construction of the Dnieper Cascade HPP allowed to ensure the generation of environmentally friendly peak electricity, which creates favorable conditions for the operation of the Ukrainian power system. The particularly important role of the Dnieper Cascade HPP in ensuring the reliable operation of the unified power system of Ukraine and environmental protection, as well as human health, is noted. The features of the operation of hydraulic structures and a brief description of the Dnieper HPP structures are given.

Keywords. hydroelectric power plant, hydraulic structure, road crossing, safety, support, spillway, carbonation, core, strength, environment, survey, assessment of technical state.