

13. Analysis of the 1 year outdoor performance of quantum dot luminescent solar concentrators / T. A. de Bruijn, R. Terricabras-Polo, A. Kaul [та ін.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. — 2023. — Т. 251.

УДК 627.8:620.9

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У ГІДРОТЕХНІЧНОМУ БУДІВНИЦТВІ

В.М. Сахно¹, В.В. Середа², В.Ю. Запорожченко³

¹ к.ф.-м.н, доцент кафедри вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін, e-mail: sakhno.v.m@dsau.dp.ua

²студент групи ГТБ-1-24, кафедра гідротехнічного будівництва, водної інженерії та водних технологій e-mail: 118025@student.dsau.dp.ua

³к.с.н, доцентка кафедри водогосподарської інженерії, e-mail: zaporozhchenko.v.ya@dsau.dp.ua

^{1,2,3}Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

Анотація. У роботі проаналізовано сучасні підходи до підвищення енергоефективності гідротехнічних споруд та мереж. Розглянуто застосування антифрикційних покриттів для зниження гідравлічних втрат у трубопроводах, методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) для елімінації зон турбулентності та кавітації, впровадження насосних агрегатів із частотним регулюванням приводів (ЧРП). Досліджено перспективи рекуперації надлишкового тиску через мікро-ГЕС, заміну традиційних матеріалів на полімерні композити та геосинтетичні, інтеграцію плавучих фотоелектричних станцій на водосховищах. Особливу увагу приділено технологіям цифрових двійників, мікро- та піко-гідроенергетиці, переходу інфраструктури на відновлювані джерела енергії та еко-інженерним рішенням.

Ключові слова: енергоефективність, гідротехнічне будівництво, антифрикційні покриття, частотне регулювання приводів, мікро-ГЕС, CFD-моделювання, цифровий двійник, еко-інженерія.

ENERGY EFFICIENCY IN HYDRAULIC ENGINEERING

Viacshaslav Sakhno¹, Volodymyr Sereda², Viktoriia Zaporozhchenko³

¹PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Higher Mathematics, Physics, and General Engineering Disciplines, e-mail: sakhno.v.m@dsau.dp.ua

²Student of group HTB-1-24, Department of Hydraulic Engineering, Water Engineering, and Water Technologies, e-mail: 118025@student.dsau.dp.ua

³PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor at the Department of Water Management Engineering, e-mail: zaporozhchenko.v.ya@dsau.dp.ua

^{1,2,3}Dnipro State University of Agriculture and Economics, Dnipro, Ukraine

Abstract. The paper analyzes modern approaches to improving the energy efficiency of hydraulic structures and networks. It examines the application of anti-friction coatings to re-

duce hydraulic losses in pipelines, computational fluid dynamics (CFD) methods for eliminating turbulence and cavitation zones, and the implementation of pumping units with variable frequency drives (VFD). The study explores the prospects of excess pressure recovery via micro-hydropower plants, the replacement of traditional materials with polymer composites and geosynthetics, and the integration of floating photovoltaic plants on reservoirs. Special attention is given to digital twin technologies, micro- and pico-hydropower, the transition of infrastructure to renewable energy sources, and eco-engineering solutions.

Keywords: energy efficiency, hydraulic engineering, anti-friction coatings, variable frequency drives, micro-hydropower plants, CFD modeling, digital twin, eco-engineering.

Вступ. Глобальна інфраструктура водопостачання, водовідведення, іригації та гідроенергетики переживає фундаментальну трансформацію, обумовлену стрімким зростанням енергоемності процесів транспортування та розподілу води. За сучасними оцінками, насосні системи споживають близько 20–25% електроенергії промислового сектору [1], що робить гідравлічну інфраструктуру одним із найбільших секторальних споживачів енергоресурсів. В Україні ця проблема набуває особливої гостроти в умовах економічних викликів та воєнних дій, які посилюють вимоги до енергетичної автономності об'єктів водопостачання [2].

Паралельно із проблемою водного дефіциту загострюється питання екологічного впливу гідротехнічних споруд на екосистеми. Виробництво портландцементу, що традиційно використовується при зведенні масивних гребель та каналів, відповідає за значну частку глобальних викидів вуглекислого газу. Фільтраційні втрати в необлицьованих земляних каналах призводять не лише до дефіциту води, а й до марнування електроенергії, витраченої насосними станціями на її забір та перекачування [3]. Все це формує імператив декарбонізації гідротехнічної галузі та переходу до високотехнологічних, кіберфізичних та екологічно інтегрованих систем.

Мета роботи — комплексний аналіз сучасних інженерних, матеріалознавчих та інформаційних підходів до підвищення енергоефективності гідротехнічного будівництва, включаючи оптимізацію гідравлічних систем, автоматизацію обладнання, застосування новітніх матеріалів та інтеграцію відновлюваних джерел енергії.

Оптимізація гідравлічних систем

Одним з ключових питань оптимізації гідравлічних систем є використання антифрикційні покриття для зниження гідравлічних втрат.

У більшості магістральних трубопроводів потік рідини має турбулентний характер, що супроводжується утворенням хаотичних вихорів біля стінок труби, які поглинають значну кількість кінетичної енергії та створюють суттєвий гідравлічний опір [4]. Експериментальне дослідження підтвержує, що нанесення гідрофобного покриття на внутрішню поверхню ПВХ-

трубопроводу забезпечує зниження гідравлічних втрат напору в умовах перехідного режиму течії, причому ефект зростає зі збільшенням числа Рейнольдса [5].

CFD-моделювання впливу шорсткості стінок на лінійні втрати у круглих трубопроводах засвідчило критичну залежність: при досягненні безрозмірного значення відстані між елементами шорсткості рівного 30 перепад тиску стабілізується, а подальше зменшення відстані вже не покращує гідравлічну ефективність [4]. Найбільш революційним напрямком є нанокompозитні покриття із самозмащувальними наноструктурами дисульфиду молібдену (MoS_2) та дисульфиду вольфраму (WS_2) з коефіцієнтом тертя нижче 0,1 [4].

Друге питання – це проектування трас із мінімальною кількістю місцевих опорів.

Втрати енергії у гідравлічних системах формуються не лише за рахунок лінійного тертя, а й через наявність місцевих опорів — колін, трійників, засувок та переходів. Ключовим параметром оптимізації є відношення радіуса кривизни коліна до внутрішнього діаметра труби (R/D). Оптимальний баланс між мінімальною ерозією та мінімальним гідравлічним опором досягається при $R/D = 1,5 \div 2,0$. Сучасний підхід вимагає оптимізації мережі ще на стадії CAD-проекування із застосуванням методик обчислювальної гідродинаміки [6].

CFD-моделювання для виключення турбулентності та кавітації

Обчислювальна гідродинаміка (Computational Fluid Dynamics, CFD) стала стрижневою технологією проектування гідротехнічних споруд [6]. CFD-моделювання для виключення турбулентності та кавітації є важливою складовою оптимізації системи водопостачання та водовідведення.

Кавітація — феномен утворення та раптового схлопування бульбашок пари — ініціюється, коли локальний тиск у потоці падає нижче тиску насиченої пари. CFD-моделювання кавітаційних характеристик відцентрових насосів із використанням моделі Schnerr–Sauer підтвердило, що об'ємна частка пари досягає максимуму в критичній точці кавітації, після чого ефективність насосу різко падає. Оптимізація геометрії лопатевої системи робочого колеса на основі методу поверхні відгуку (Response Surface Method) у поєднанні з CFD дозволяє одночасно покращити гідравлічний ККД та кавітаційну стійкість.

Сучасне обладнання та автоматизація

Традиційні насосні системи з фіксованою швидкістю обертання є вкрай неефективними, особливо при зниженні споживання. Надлишковий напір «гаситься» засувками, а насос споживає повну потужність, що приводить до значних витрат електроенергії. Впровадження частотного регулювання приводів (ЧРП) докорінно змінило парадигму насосних систем. Енергетична

ефективність базується на законах подібності (афінності) відцентрових насосів, згідно з якими споживана потужність пропорційна кубу швидкості обертання робочого колеса.

Зниження швидкості на 20% призводить до падіння потужності майже на 50%. Дослідження водоочисної станції у Єгипті, опубліковане в Scientific Reports, підтвердило економію електроенергії від 22 до 65% залежно від сезону при впровадженні частотного регулювання приводів [7]. Комплексний аналіз програми IAC (Industrial Assessment Centers) Міністерства енергетики США на базі даних тисяч промислових підприємств засвідчив середню економію 20–50% при встановленні ЧРП на насосах та вентиляторах.

Вітчизняні дослідження підтверджують ці результати. Оптимізація електроприводів насосних агрегатів систем водопостачання із застосуванням комбінованого частотного регулювання на базі трьох агрегатів забезпечила зниження питомої енергоємності до 0,06 кВт·год/м³, що відповідає до 60% енергозбереження порівняно з нерегульованими системами [7].

У зонах мережі з надлишковим тиском традиційно встановлюються редуційні клапани (PRV) для дисипації колосальної кінетичної енергії потоку. Передовою тенденцією є їх заміна на мікро-ГЕС [8] або насоси у реверсивному турбінному режимі, так званий режим «Pump-as-Turbine». Моделювання в середовищі EPANET для регіональної водопровідної мережі Тегерану продемонструвало, що встановлення мікро-ГЕС на місці редуційних клапанів дозволяє вилучити з мережі 168,21 кВт потужності, що покриває в середньому 42,3% електроспоживання насосних станцій тієї ж мережі. Розрахунки ефекту рекуперації енергії наведено в роботі [9]. Масштабна оцінка потенціалу рекуперації енергії, яка була виконана для шести країн ЄС (Ірландія, Шотландія, Уельс, Іспанія, Португалія), засвідчила наявність тисяч придатних локацій у секторах питного водопостачання, іригації та водовідведення.

Матеріали та конструктивні рішення

Полімерні композити, армовані скловолокном (FRP/GRP), демонструють фундаментальні переваги. Використання композитних матеріалів замість традиційних сталі та бетону надає масу переваг. Серед них, можна привести такі найяскравіші переваги, як абсолютна корозійна та хімічна стійкість. Безпрецедентне співвідношення міцності до ваги зі зниженням маси конструкцій до 80% порівняно зі сталевими аналогами визначає на сьогодні перспективи застосування таких технологій.

Для захисту навантажених елементів ГЕС зараз використовуються надтверді керамічні покриття з карбіду вольфраму (WC) та карбіду хрому (Cr₃C₂), а також надвисокомолекулярний поліетилен (UHMWPE) для футерування водоскидів та затворів [10].

Треба відмітити значення використання геосинтетичних матеріалів для гідроізоляції в системах іригації. Фільтраційні втрати в земляних іригаційних каналах досягають катастрофічних масштабів. Огляд сучасних технологій гідроізоляції іригаційних каналів підтверджує високу ефективність застосування геомембран для повної протифільтраційної ізоляції водогосподарських та природоохоронних об'єктів [11]. Геомембрани створюють ідеально гладку поверхню, здатну протистояти ерозії при високих швидкостях течії, а раціональне розміщення шару геотекстилю під геомембраною суттєво зменшує розтягуючі напруження, захищаючи плівку від проколів.

Плавучі фотоелектричні станції на водосховищах

Розміщення плавучих сонячних електростанцій (FPV) на водному дзеркалі вирішує важливу проблему конкуренції за земельні площі [12]. Комплексне дослідження, опубліковане в Nature Sustainability, оцінило практичний потенціал генерації FPV. Якщо покрити 30% від 114 555 глобальних водосховищ, генерація електроенергії буде складати 9 434 ТВт·год/рік. Окрім цього, це надасть зниження випаровування вологи Об'єм збережених водних ресурсів складе 106 км³ води.

До того ж, симбіотичні переваги розміщення сонячних панелей на поверхні водоему включають підвищення ККД панелей завдяки природному водяному охолодженню.

Гібридизація таких панелей з ГЕС теж надасть значні переваги. При цьому, сонячна електрика використовується вдень, а вода накопичується для нічної генерації. Моделювання для водосховища Насер (Єгипет) показало зниження випаровування на 25–60% залежно від відсотка покриття.

Основні сучасні напрямки розвитку

Слід відзначити сучасну технологію цифрових двійників гідротехнічних вузлів (Digital Twins, DT).

Технологія цифрових двійників еволюціонує до ключових платформ прогнозованого управління інфраструктурою. Технологія цифрових двійників водного сектору охоплює водопостачання, водовідведення, водоочищення, опріснення та рекуперацію.

Дослідження, яке наводилось в «Journal of Hydroinformatics» (IWA), представило стандартизовану платформу цифрових водних сервісів (Digital Water Services), де цифровий двійник водопровідної мережі поєднується з методами штучного інтелекту для оптимальної сегментації мережі на зони та планування відновлювання трубопроводів. Технологія цифрових двійників перетворює водопровідну мережу на акумулятор енергії. Тобто, аналізуючи тарифи в реальному часі, система активує насоси під час найдешевшої електроенергії, закачуючи воду у висотні резервуари, а в години пікових тарифів вода постачається самопливом.

Друга сучасна технологія - Мікро- та піко-гідроенергетика.

Мікро-гідроенергетика охоплює установки потужністю від 5 до 100 кВт, піко-гідроенергетика — до 5 кВт [13]. Такі установки в водопровідних мережах забезпечують стабільну якість води без використання абразивних наночастинок. Це підвищує прогнозованість генерації та знижує знос турбін.

В якості ключових переваг мікро- та піко-гідроенергетики [14] можна зазначити наступні:

- децентралізований характер генерації для автономного енергопостачання віддалених громад;
- мінімальний екологічний вплив завдяки відсутності великих гребель;
- висока мобільність та компактність установок (монтаж за 1–2 дні);
- інтеграція в існуючу інфраструктуру (іригаційні канали, водопровідні мережі);
- прогнозованість генерації у трубопровідних мережах.

Сучасні очисні споруди є одними з найбільших муніципальних споживачів електроенергії. В умовах воєнних дій в Україні перехід насосних та очисних споруд на живлення від сонячних або вітрових парків стає стратегічною необхідністю для забезпечення безперебійності водопостачання [2]. Інноваційним напрямком є мікробні паливні елементи (Microbial Fuel Cells) — біоелектрохімічні реактори, де електрохімічно активні бактерії окислюють органічні забруднювачі стічних вод, одночасно генеруючи електричний струм.

Природоорієнтовані рішення використовують природні ландшафти для виконання функцій, які раніше покладалися на енергоємну «сіру інфраструктуру». Конструйовані водно-болотні угіддя здатні видаляти значну частку азоту та фосфору виключно за рахунок природного метаболізму бактерій, не потребуючи аерації та хімічних реагентів. Управління паводками реалізується через відновлення меандрування річок. Прямі канали (створені людиною) змушують воду рухатися занадто швидко, що призводить до руйнівних паводків нижче за течією. Меандри (утворення звивин, лукастих вигинів русла річки) сповільнюють потік, даючи воді час просочитися в ґрунт і підживити екосистему

Біоретенційні зони (спеціально сконструйовані заглиблення в ландшафті, призначені для збору, затримки та очищення зливових вод) під час зливи працюють як губка, затримуючи воду і не даючи їй миттєво переважати каналізаційні мережі.

Висновки.

1. Комплексний підхід до енергоефективності гідротехнічного будівництва вимагає одночасного впровадження антифрикційних покриттів (зниження коефіцієнта тертя нижче 0,1), CFD-оптимізації геометрії трубопрово-

дів та інтелектуальних систем ЧРП, що забезпечує скорочення енергоспоживання на 20–60% і трансформує водопровідні мережі з монопольних споживачів енергії на генератори «чистих» кіловатів через рекуперацію надлишкового тиску мікро-ГЕС.

2. Матеріалознавча революція з використанням FRP-композитів, геосинтетичних мембран, плавучих фотоелектричних у поєднанні з технологіями цифрових двійників та природоорієнтованими рішеннями еко-інженерії формує новітній підхід, де гідротехнічна інфраструктура проєктується як органічна частина біосфери.

3. Децентралізована мікро- та піко-гідроенергетика є ключовим інструментом подолання енергетичної бідності віддалених громад без екологічних наслідків великих гребель, забезпечуючи мобільність, швидкий монтаж та інтеграцію в існуючу іригаційну та водопровідну інфраструктуру.

ЛІТЕРАТУРА

1. Енергозбереження в компресорних системах : навч. посіб. / С. О. Шарапов. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 147 с. – URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a84d3321-0f60-4740-9410-a55177756e59/content>.
2. Кравчук О. Основні виклики та заходи для забезпечення стабільної роботи насосних станцій систем водопостачання та водовідведення під час воєнних дій / Олександр Кравчук, Олександр Возний. – 2024. – DOI: 10.59647/978-617-520-936-3/1.
3. Основи гідромеліорацій : навч. посіб. / О. С. Петренко. – Київ : КНУБА, 2023. – 160 с. – URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/878734a6-fd45-4d4c-a9a6-3765145fd247/content>.
4. Коноплянченко Є. В. Розробка системи спрямованого вибору технології досягнення необхідної якості поверхні деталей насосного обладнання АЕС при їх виготовленні та ремонті / Є. В. Коноплянченко, Н. В. Тарельник // Вісник ХНТУ. – 2025. – Вип. 1. – Одеса : Гельветика. – С. 96–104.
5. Павелко В. І. Удосконалення системи технічного водопостачання енергетичного комплексу / В. І. Павелко, Д. В. Лісовик, М. В. Терепенко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2018. – Т. 24, № 4. – С. 169–177. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2018_24_4_19.
6. Обчислювальна гідроаеромеханіка : конспект лекцій / уклад.: А. В. Загорулько, Д. О. Кайота. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 102 с. – URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/2a002113-1d82-4472-91f4-b38bea9b1023/content>.
7. Лупеха Д. Ю. Підвищення енергоефективності системи комунального тепло-водопостачання за рахунок використання регульованого електропривода : [електронний ресурс] / Дмитро Юрійович Лупеха. – 2022.
8. Сучасні підходи до гідравлічного моделювання систем водопостачання та водовідведення: міжнародний досвід та перспективи для України / О. Кравченко, Т. Куба, О. Нечипор, Н. Таварткіладзе // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2025. – Вип. 50. – С. 49–60. – DOI: 10.32347/2524-0021.2025.50.49-60.

9. Форись С.М. Рекуперация низькопотенційного тепла технологічних процесів для автономного енергозабезпечення підприємств / С.М. Форись, А.Ю. Усенко, В.Я. Перерва // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2025. – Вип. 1.3 (94). – С. 292–300. – DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.35.
10. Стефанів Б. В. Вплив карбїду вольфраму на структуру та властивості зносостійких покриттів, отриманих різними методами (Огляд) / Б. В. Стефанів, С. В. Максимова. – 2025. – DOI: 10.37434/as2025.05.01.
11. Морозов О. Застосування геомембрани Solmax HDPE з поліетилену високої щільності у разі відновлення протифільтраційного облицювання зрошувальних каналів у південному регіоні України / Олексій Морозов, Володимир Морозов, Євген Козленко. – 2021. – DOI: 10.32851/tnv-tech.2021.4.8.
12. Цикунов В. Енергетична безпека сільського господарства: інновації та стратегічне планування / Владислав Цикунов // Економіка та суспільство. – 2025. – № 71. – DOI: 10.32782/2524-0072/2025-71-56.
13. Botirovich Q. D. Practices and Principles of Using Water Wheels in the Development of Microges in Small River Water / Qodirov Dilshod Botirovich. – 2022. – DOI: 10.15680/IJRSET.2022.1104144.
14. Закорчевна Н.Б. Сучасний стан малої гідроенергетики в Україні / Н.Б. Закорчевна, Н.А. Нагорнева // Екологічні науки. – 2021. – № 3. – С. 86–95. – DOI: 10.32846/2306-9716/2021.eco.3-36.14.

УДК 669.715; 004.85

ФОРМУВАННЯ ПІДХОДУ ДО БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ІНТЕГРОВАНОГО ОЗНАКОВОГО ПРОСТОРУ

К.М. Брежнєв¹, З.В. Сазанішвілі²

¹аспірант, група М3а-25-10, e-mail: brezhniev.k.m@nmu.one

²к.т.н., доцент, e-mail: sazanishvili.z.v@nmu.one

^{1,2}кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

Анотація. У роботі розглянуто проблему прогнозування механічних властивостей деформівних алюмінієвих сплавів – межі текучості, тимчасового опору розриву та відносного подовження – на основі хімічного складу, технологічних і мікроструктурних параметрів із застосуванням нейронних мереж. Узагальнено закономірності формування механічних властивостей за основними серіями сплавів. Показано обмеженість традиційних аналітичних і напівемпіричних підходів у задачах із одночасним варіюванням кількох взаємодіючих факторів. Проаналізовано сучасний стан нейромережевих моделей прогнозування для Al-сплавів; виявлено принципову прогалину – відсутність моделі, яка поєднує хімічні, технологічні та мікроструктурні ознаки в єдиному ознаковому просторі при багатоцільовому прогнозі з кількісним SHAP-аналізом пояснюваності. Сформульовано мету та наукові завдання дослідження.