

УДК 621.31001

В.П. Пустовойтенко, к.т.н.,  
Ю.Т. Розумний, проф., д.т.н.,  
І.О. Садовенко, проф., д.т.н.  
Національний гірничий університет

## ПІДЗЕМНА ПІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ (ПГЕС) ЯК ЕКОЛОГІЧНИЙ І ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РЕГУЛЯТОР

*Розглянута технічна ідея розташування підземної гідроелектростанції у виробках вугільної шахти, що закривається. Надане гідродинамічне обґрунтування режиму роботи ПГЕС.*

Підземні виробки шахт, що закриваються, мають високий рівень готовності для їхнього використання як підземних об'єктів господарського призначення і додання геотехногенної стійкості території, де вони розташовані. Розглянемо варіант розміщення ПГЕС у підземних виробках вугільних шахт з метою покриття пікових навантажень в енергосистемі і підтримання рівня підземних вод у припустимих межах.

### **Технічна ідея ПГЕС як регулятора пікових навантажень в енергосистемі.**

Покриття змінної частини добових графіків навантаження в енергетичній системі (ЕС), особливо її піків, коли за короткі проміжки часу (хвилини, десятки хвилин) відбуваються різкі зміни режиму електроспоживання, є не тільки технічно складним завданням, але і викликає значні збільшення витрат в енергосистемі. Це обумовлено збільшенням витрат палива, утриманням спеціального маневреного устаткування чи устаткування з підвищенням маневреності базових агрегатів, зниженням терміну служби устаткування і т.і. Додаткові витрати викликаються тижневою нерівномірністю графіка навантаження, тому що це часто пов'язано з зупинкою великої кількості агрегатів в енергосистемі у вихідні і святкові дні, а також річною (сезонною) нерівномірністю.

У пікових зонах графіка електричних навантажень дефіцит потужностей призводить до необхідності введення графіка аварійних відключень споживачів.

У галузі регулювання режимів електроспоживання водовідливними установками доцільно розглянути технічну можливість створення насосів головного водовідливу оборотними, за прикладом оборотних гідротурбін на електричних станціях, що гідроакумулюють (ГАЕС). З огляду на великі геодезичні напори шахт, можна реалізувати ідею сполучення двох функцій (головного водовідливу і ГАЕС) і цим значно підвищити ефективність регулювання режимів електроспоживання водовідливними установками за рахунок додаткового акумулювання енергії.

За своєю основною суттю пропонується така схема роботи водовідливної установки. У періоди мінімальних навантажень ЕС водовідливна установка працює в насосному режимі і відкачує шахтну воду на поверхню у ставок-відстійник. Коли настає максимум навантаження ЕС, насоси водовідливної установки не відключаються, а переходять у гідротурбінний режим. Їхні двигуни працюють у режимі генерування електроенергії. Насос-турбіна обертається під дією напору води по водовідливним ставам, що забирають воду від ставка-відстійника на поверхні шахти.

Для реалізації цієї схеми необхідно збільшити місткість водозбірників, а замість насосів із двигунами встановити оборотну гідротурбіну з електричною машиною, здатною працювати в режимі двигуна і генератора. Така основна технічна сутність ідеї ПГЕС.

### **Гідрогеологічне й екологічне обґрунтування ПГЕС.**

Порушення природного режиму підземних вод виникають на самому початку будівництва шахти – при проходці стовбурів. Припливи у стовбури частіше не перевищують 20 м<sup>3</sup>/год, у період проходки, а потім – приглушуються кріпленням і тампонажем до нормативних (сумарно не більше 8 м<sup>3</sup>/год). Тому гідродинамічна депресія в пристовбурній зоні активно формується при обладнанні біля пристовбурних дворів і проходці квершлагів. Найбільш інтенсивно дренують воду тектонічні порушення, причому в первісній фазі поглинання статичних запасів водопритоки можуть досягати 200 і більше м<sup>3</sup>/год, але потім загасають до залишкових (10–20 м<sup>3</sup>/год), що забезпечуються динамічними запасами підземних вод.

Найбільш активно дренуються підземні води над очисними виробками, де гідравлічний контакт формується вертикальними тріщинами і тріщинами розшарування на висоту, кратну 35

випірковим потужностям вугільних шарів з нелінійним загасанням проникності від шару нагору. Найбільша водопроникність тріщин обвалення і максимальне зниження рівнів відмічається на початку після посадки основної покрівлі в лавах. У водоносних горизонтах, вилучених від покрівлі вугільних шарів, що відпрацьовуються, спостерігається помітно менше зниження рівнів, а за межами зон обвалення рівні знижуються за рахунок фільтраційного транзиту води до порушеної зони.

Надалі відбувається задування тріщин, і рівні відновлюються до відміток загальшахтної гідралічної депресії, що підтримується водовідливом. Найбільш низькі фільтраційні опори формуються по контуру, що збігається з підготовчими виробками. Навіть при їхньому погашенні вони визначають границі дренажного контуру шахти, що збігаються з технічними границями відпрацьовування.

Ці дані мають загальний характер для шахт Донбасу і добре підтверджуються гідрогеологічним зніманням шахтних полів. Збіжки між шахтними полями можуть об'єднати їхні дренажні контури в одну гідродинамічну мережу.

З розглянутих вище особливостей геолого-гідрогеологічної будови Донбасу і технічної ідеї створення ПГЕС у шахтах просліджується два можливих варіанти.

Перший – створення гідралічно ізольованої мережі виробок акумуляторів води на заданій глибині. Очевидно, що підтримку рівневого режиму за межами ПГЕС необхідно здійснювати автономним водовідливом чи здійснити затоплення породного масиву при ліквідації водовідливу.

Другий – виробки-гідроакумулятори в системі ПГЕС фільтраційно з'єднані з дренажною мережею шахти за допомогою фільтруючих перемичок. Це забезпечує технічну стерильність ПГЕС і одночасно включає в гідродинамічну схему її роботи навколишній породний масив.

На рис. 1 представлені основні елементи гідродинамічної схеми в межах суміжних шахтних полів із включенням ПГЕС за другим варіантом.

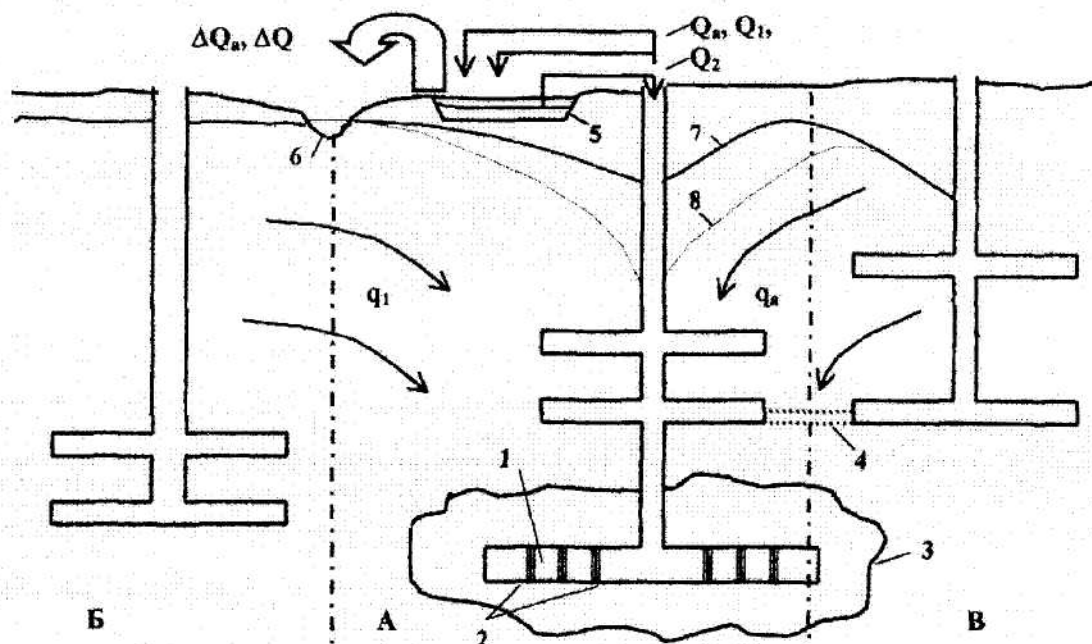


Рис. 1. Гідродинамічна схема роботи ПГЕС:

А – шахта ПГЕС; Б – затоплена шахта; В – працююча шахта;  $Q_1, Q_2, Q_a$  – добові витрати води при роботі ПГЕС у звичайному режимі й аварійному ( $Q_a$ ) при підтопленні працюючої шахти В;  $\Delta Q, \Delta Q_a$  – те ж, при скиданні залишкових витрат;  $q_1, q_a$  – перетік підземних вод у відповідних нормальному й аварійному режимах; 1 – виробки-акумулятори води ПГЕС; 2 – фільтруючі перемички; 3 – зона гідродинамічного впливу при роботі ПГЕС на водовідлив; 4 – збіжка; 5 – накопичувач води; 6 – поверхневий водотік; 7, 8 – рівень підземних вод відповідно при нормальному й аварійному режимах роботи ПГЕС

Розглянемо ряд особливостей можливого застосування ПГЕС як регулятора рівневого режиму при затопленні шахт і регулятора водовідливу шахти, суміжної з затоплюваною. Ці завдання неминуче виникають при закритті шахт у зв'язку з тим, що гірничими підробітками видозмінений первісний (природний) ландшафт, а отже, і його роль у природній дренажній мережі, водно-сольовому обміні проникного масиву між суміжними шахтами.

Аналіз фактичних даних свідчить про значне розходження у швидкості затоплення шахт у порівнянні з очікуваним заповненням щільності гірського масиву. Режим затоплення ділянок, зв'язаних збійками шахт був складним. Нижні горизонти затоплювалися майже ізольовано, а потім відбувався перетік через збійки, а також прогресувала фільтрація через цілини. Швидкість затоплення шахт коливалася від декількох сантиметрів до 1,8 м/доб. Рівневий режим затоплення помітно реагував на періоди інтенсифікації атмосферних опадів. Вода, що надходила з затоплених шахт, мала, як правило, більш високу мінералізацію в порівнянні з відкачуваною до затоплення (іноді в 4–5 разів).

Таким чином, у гідравлічній схемі "шахта-ПГЕС" просліджується необхідність включення її в роботу як екологічного регулятора рівневого режиму затоплюваних шахт, а також водовідливного буфера, що перешкоджає аварійному затопленню суміжних шахт (чи цілеспрямовано підтримує водовідливні потужності шахт у стадії їхньої сухої консервації). Гідродинамічна схема на рис. 1 не містить технічних і гідродинамічних протиріч, що можуть бути перешкодою в здійсненні цього напрямку.

### **Моделювання режиму роботи ПГЕС.**

Розглянута гідродинамічна схема використання шахти для ПГЕС є варіантом неоднорідного геологічного середовища, що дренується стоковими поверхнями виробок, що виконують одночасно функцію накопичувачів води, які використовувалася у фазі роботи ПГЕС. Додаткові фактори просторової і тимчасової неоднорідностей обумовлені зміною режимів акумулювання і відкачки в добовому і річному циклах, а також концентрацією фільтраційного зв'язку виробок з гідродинамічно неоднорідним масивом порід. Крім уже зазначених складностей при схематизації аналітичної розрахункової схеми, ці фактори визначають вибір чисельного варіанта гідродинамічних розрахунків роботи гірського масиву разом із ПГЕС.

Як об'єкт для побудови моделі на етапі оцінних розрахунків, якими необхідно підтвердити принципову можливість функціонування ПГЕС, може бути використана будь-яка шахта ЦРД. У нашому розпорядженні є гідрогеологічна інформація про всі шахти, тому зупинимося на варіанті з достатньою щільністю масивів даних, до яких належить шахта ім. Артема. Зазначимо одночасно, що принципових труднощів у реалізації моделі будь-яка інша шахта (чи група шахт) не має.

Аналіз карти гідроізогіпс кам'яновугільного водоносного горизонту на полі шахти ім. Артема і суміжних шахт визначає наявність слабкопроникної зони між верхньою і нижньою продуктивними товщами карбону. Це дозволяє приймати для розрахунків тришарову геофільтраційну схему, два шари з якої розглядаються як водоносні горизонти, а третій – як слабкопроникна поділяюча зона.

Верхня водомістка товща безнапірна, підшва її прийнята на відмітці (– 150 м). Нижня водомістка товща напірна. Абсолютні відмітки її покрівлі складають (– 300 м), підшви – (– 1000 м). Потужність поділяючого шару – (зони) 150 м.

Зовнішні границі: на півночі досліджуваної території (у склепінні антиклинарія) задається гранична умова II роду, що характеризує живлення водоносних горизонтів. Величина цього живлення, виходячи з карти гідроізогіпс, оцінюється величинами 1000–2000 м<sup>3</sup>/доб. На південно-заході – гранична умова III роду, що відбиває гідродинамічний взаємозв'язок між водоносними горизонтами, що моделюються, та ріками Кривий Торець і Залізна. На заході і сході досліджуваної території задається гранична умова II роду з величиною витрати потоку, що дорівнює нулю, чим забезпечується гідродинамічна ізольованість досліджуваної території за даною границею, що очевидно проглядається з регіональних даних.

Внутрішні границі задаються в нижній водомісткій товщі карбону в межах шахтних полів у вигляді граничної умови I роду з величиною гідродинамічного напору, що дорівнює абсолютній дренажній відмітці робочих горизонтів суміжних шахт, а для оцінюваної шахти (ім. Артема) поперемінно в режимі роботи ПГЕС задаються напори на сполученнях виробок.

Зворотна задача полягає в уточненні фільтраційних параметрів водоносних горизонтів (водопровідність, водовіддача) і поділяючої товщі (параметр перетоку) шляхом досягнення

збіжності модельних і фактичних водопритоків за десятирічний період (1985–1995 р.), а також збігу розподілу абсолютних відміток рівнів підземних вод верхньої водомісткої товщі, що відповідають карті гідроізогіпс.

Рішення зворотних і прямих задач за наведеним алгоритмом проводилось для вивчення динаміки рівнів і водопритоків на стадіях ідентифікаційних досліджень, а також при прогнозуванні режиму роботи ПГЕС і затопленні шахти ім. Артема.

Ідентифікація моделі і фактичного поведіння гірських порід у різних режимах фільтрації досягається завданням на моделі масивів вхідних даних, що дозволяють одержати розрахункові водопритокі, близькі до фактичних (обмірюваним раніше на об'єкті).

У нашому розпорядженні є дані на глибину 10 років за шахтами, що враховувалися у фільтраційній області моделі як взаємодіючі (шахти ім. Артема, «Північна», «Південна», ім. Дзержинського, ім. Гагаріна).

Відхилення модельних водопритоків протягом епігнозного періоду моделювання не перевищує 16 %, складаючи в середньому 10 %. Абсолютна величина погрешності між модельними і фактичними водопритокими складає 20–50 м<sup>3</sup>/доб.

Пряма (прогнозна) задача полягала у визначенні динаміки рівнів у нижній і верхній товщах при затопленні шахти ім. Артема, а також при роботі обладнаної на ній ПГЕС. У першому випадку в межах сіткового контуру, що збігається з границями шахти ім. Артема, була виключена границя першого роду, а початкове значення напорів збігалось з оцінками нижньої дренажної границі за станом на 1995 рік.

Зазначимо, що умова невизначеності реального відключення водовідливу за часом, а також можлива зміна нижніх дренажних границь суміжних шахт (положення внутрішньої границі першого роду) не додає погрешності в розрахунках більших, ніж досягнуті балансові непогодження. Принаймні, це однозначно належить до періоду прогнозування на три роки. Заданий початковий крок за часом (300 діб) обумовив його подальшу функціональну зміну до 5300 діб (~ 15 років) після відключення водовідливу.

Результати прогнозних розрахунків представлені на графіках (рис. 2).

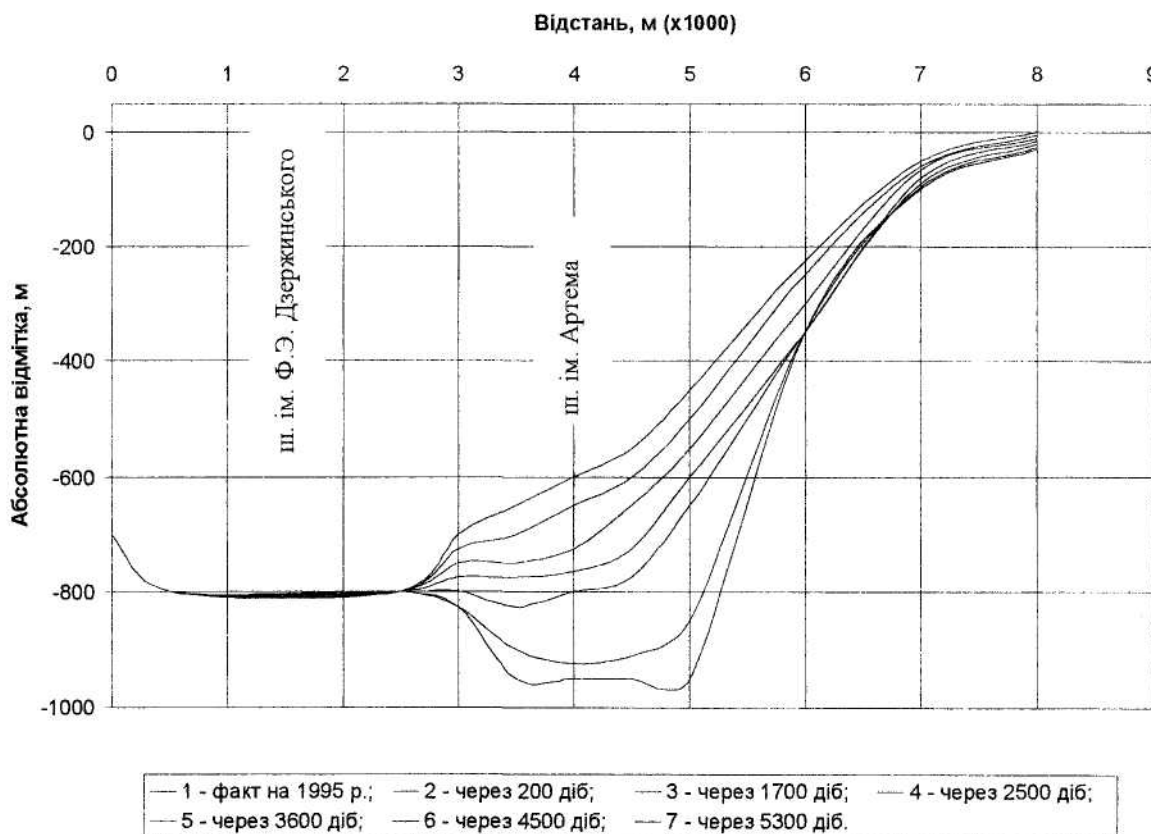


Рис. 2. Рівні підземних вод нижньої товщі

Як бачимо, підйом рівневої поверхні в нижній продуктивній товщі шахти ім. Артема на прогнозований період може досягти максимальної відмітки – 460 м на південній границі шахтного поля.

Включення в роботу ПГЕС на моделі здійснено в двох варіантах. Перший – у вигляді ізольованого ємнісного контуру, що являє собою порожнину виробок із майже герметичним обробленням (коефіцієнт фільтрації оброблення 0,0001 м/доб, що відповідає проникності бетону).

Як і очікувалося, результати модельних розрахунків не змінилися (принаймні в межах точності розрахунків). Це свідчить про те, що при герметичному виконанні підземних виробок – акумуляторів води – ПГЕС не може здійснювати функції екологічного регулятора рівневого режиму підземних вод затоплюваної і суміжної шахт.

У другому варіанті всередині фільтраційної області задані проникні ділянки в місцях сполучення магістральних виробок-акумуляторів і виробок, що погашаються. Це забезпечує гідродинамічний зв'язок ПГЕС з навколишнім масивом, але одночасно зберігає необхідну технічну стерильність виробок-акумуляторів. Це здійснено шляхом зведення перемичок у вигляді зворотних фільтрових пробок.

При моделюванні скиду води в результаті роботи агрегатів ПГЕС у режимі відкачки шляхом завдання «нульового» напору на проникних перемичках, коливання рівнів у масиві не далі 250 м у порівнянні з варіантами постійно заданих стоків усередині області, а витрати води по контуру відрізняються при різних оцінках рівнів на величину  $V$ , що дорівнює водопритоку в шахту при її роботі на різних горизонтах (рівнях). Це дуже важливо, тому що ПГЕС у цьому випадку сполучає функції екологічного регулятора рівневого режиму підземних вод, а також регулятора водовідливу суміжних шахт.

Потужність ПГЕС у межах шахтного поля як екологічного регулятора достатня при забезпеченні її продуктивності в режимі відкачки у вигляді суми  $(V + V)$ , де  $V$  – обсяг відкачуваної води, накопиченої в режимі роботи ПГЕС;  $V$  – 20 % добового водопритоку в шахту, що фіксувався на горизонті розміщення виробок-акумуляторів.

При затопленні суміжних шахт  $V$  корегується гідродинамічним розрахунком з обліком екологічно прийнятного рівня затоплення.

Потужність ПГЕС у межах декількох шахтних полів регіону як екологічного і гідродинамічного регуляторів водовідливів може вибиратися аналогічно, але при цьому  $V$  представляє собою суму необхідних обсягів добових перепусків води в шахту (чи ряд шахт), де розміщена (чи розміщені) ПГЕС.

З результатів моделювання випливає, що нагромадження обсягів води, необхідних для роботи ПГЕС з найбільшою швидкістю, досягається при розміщенні виробок-акумуляторів на нижньому обрії шахти. Видно, що для їхнього затоплення досить 1–1,5 місяця.

Дуже важливо, що величина добового скидання ПГЕС у режимі роботи її агрегатів на водовідлив складає дуже малу величину в порівнянні з потужністю агрегатів, тому використання ПГЕС як екологічного і гідродинамічного регуляторів водовідливів шахт у режимах їхньої мокрої чи сухої консервації здійснено на будь-якій стадії реструктуризації шахт, а також може розглядатися як аварійний варіант стабілізації виниклих гідродинамічних ускладнень (підтоплення територій, затоплення суміжних працюючих шахт, активізація зрушень гірського масиву і т.д.).

**ПУСТОВОЙТЕНКО Валерій Павлович** – кандидат технічних наук, міністр транспорту України.

Наукові інтереси:

- освоєння підземного простору.

**РОЗУМНИЙ Юрій Тимофійович** – доктор технічних наук, професор Національного гірничого університету України.

Наукові інтереси:

- електропостачання промислових підприємств;
- екологія.

**САДОВЕНКО Іван Олександрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного гірничого університету України.

Наукові інтереси:

- гідрогеомеханіка техногенних та природних об'єктів;
- керування станом техногенного середовища.