

УДК 620.91+621.311.24

Б. І. Мокін, д. т. н., проф.;

О. Б. Мокін, к. т. н.

## ПРОБЛЕМИ, ЩО ПОТРЕБУЮТЬ РОЗВ'ЯЗАННЯ НА ШЛЯХУ СТВОРЕННЯ ПОВІТРЯНИХ АКУМУЛЮЮЧИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

*Сформульовано проблеми, що потребують розв'язання на шляху створення повітряних акумулюючих електростанцій. Показано варіанти створення ПАЕС при нинішніх обмеженнях на характеристики конструкційних матеріалів та силового обладнання. Визначено перспективні напрями подальших досліджень.*

### Постановка задачі

В роботі [1] обґрунтовано актуальність та перспективність створення повітряних акумулюючих електростанцій (ПАЕС), і запропоновано варіанти їх реалізації. У цій же роботі запропоновано економіко-математичні моделі, за допомогою яких можна розрахувати економічну ефективність акумуляції електроенергії на ПАЕС.

У даній роботі ми покажемо, які із запропонованих в роботі [1] варіантів можна реалізувати вже зараз, використовуючи ті конструкційні матеріали та силове обладнання, що випускаються серійно, а які варіанти ПАЕС для своєї реалізації потребують розробки як нових конструкційних матеріалів, так і нового силового обладнання. Покажемо також, як адаптувати загальні економіко-математичні моделі для оцінки ефективності акумуляції електроенергії на ПАЕС до умов, викликаних обмеженнями на характеристики нинішніх серійних конструкційних матеріалів та нинішнього серійного силового обладнання.

### 2. Загальна характеристика проблем, які сьогодні обмежують вибір варіантів побудови ПАЕС

Почнемо з аналізу конструкційних матеріалів, необхідних для спорудження повітросховищ ПАЕС.

Залізобетон, на жаль, не витримує довгий час циклічного характеру тиску, більшого 1,8 атмосфери. Тож, навіть, якщо залізобетонним залишити лише дах повітросховища, то в ньому повітря не можна стискати більше, ніж до критичних 1,8 атмосфери.

Згідно рівняння Клапейрона [2]

$$PV = RT, \quad (1)$$

де  $P$ ,  $T$  – тиск і температура газу у повітросховищі,  $V$  – його об'єм, а  $R$  – газова константа, або рівняння Шарля при  $V = \text{const}$  —

$$\frac{T_2}{P_2} = \frac{T_1}{P_1}. \quad (2)$$

При зростанні тиску від одної ( $P_1$ ) до 1,8 ( $P_2$ ) атмосфери температура стисненого повітря ( $T_2$ ) зросте не більше, ніж у 1,8 рази від температури атмосферного повітря ( $T_1$ ). Тобто, якщо температура атмосферного повітря не перевищує 20 °С, то температура стисненого у повітросховищі повітря не перевищуватиме 36 °С. Такі значення температури стисненого повітря як і усі інші значення, адекватні температурам атмосферного повітря в кліматичному діапазоні, залізобетон витримує, тож при використанні залізобетону при спорудженні повітросховищ, очевидно, що вони будуть придатними для акумуляції електроенергії лише у повітросховищах надзвичайно великих розмірів (наприклад, у відп-

рацьованих залізорудних шахтах) — це обумовлено низьким ступенем стиснення повітря у них.

Зауважимо, що в таких повітросховищах недоцільно монтувати трубопроводи для відбору тепла, оскільки у зв'язку з низьким ступенем стиснення повітря там його не накопичуватиметься в таких кількостях, які потрібні для функціонування тепломереж. Тож і не матимемо підвищення ефективності ПАЕС з низькотисковими повітросховищами за рахунок використання теплової енергії та спорудження над ними теплиць.

Якщо ж відмовитись від залізобетону і використовувати в якості конструкційного матеріалу для повітросховищ метал, то в них можна досягти і великих ступенів стиснення повітря, і значних діапазонів перепаду температур, але каркаси таких повітросховищ коштуватимуть значно дорожче, що суттєво знижуватиме економічну ефективність ПАЕС, навіть, незважаючи на те, що у цьому випадку можна буде використовувати частину теплової енергії за допомогою внутрішньої тепломережі і споруджувати теплиці на «даху» повітросховищ.

Однак, кількість металевих конструкцій при спорудженні високотискових та високотемпературних багатопверхових повітросховищ можна суттєво скоротити, якщо замість плит перекриття використовувати лише багатореберні решітки, залишивши суцільні металеві плити лише в якості «даху», «стін» та «підмурку» повітросховища, як це показано на рис. 1.

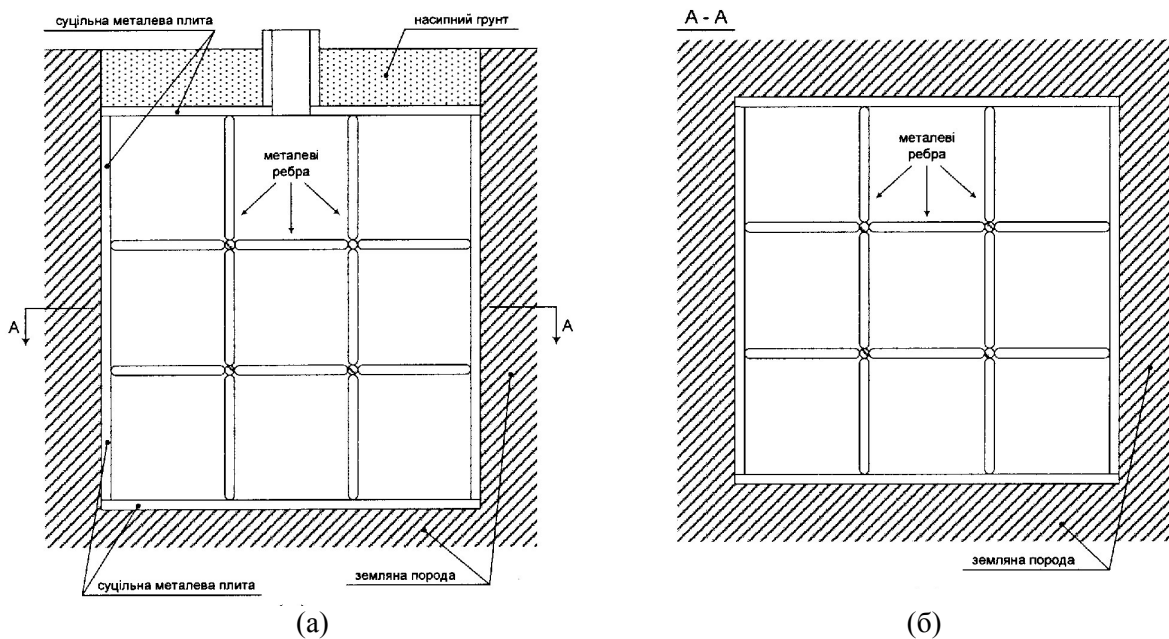


Рис. 1. Вертикальний (а) та горизонтальний (б) перерізи повітросховища з високим ступенем стиснення повітря у м'яких ґрунтах

У цьому випадку, повітросховище буде нагадувати надуту повітрям металеву каністру з привареними всередині повздовжніми та поперечними металевими ребрами, закопану у землю. Очевидно, що напруга розтягування та стискання при «повітряному диханні» такої «каністри» буде виникати лише в повздовжніх ребрах та в «даховій» плиті. Що ж до «стінових» плит та «підмурівкової», то вони, в основному, служитимуть засобом захисту від осипання ґрунту зі стін повітросховища в процесі роботи з наповнення та випуску повітря та засобом захисту від просідання днища повітросховища в процесі цієї роботи. А тому, якщо повітросховище споруджується у скальних чи залізорудних породах, наприклад, у відпрацьованих залізорудних кар'єрах, стінки яких здатні витримувати широкий діапазон перепаду температур і тисків, то необхідність в суцільних металевих «стінах» і суцільному «підмурівку» відпадає — їх можна замінити металевими бандажами із двотаврових чи швелерних балок, з'єднаними лише з повздовжніми та поперечними металевими ребрами, або ж взагалі, навіть, без бандажів на стінах, защемивши кінці усіх поперечних ребер в них так, як показано на рисунку 2.

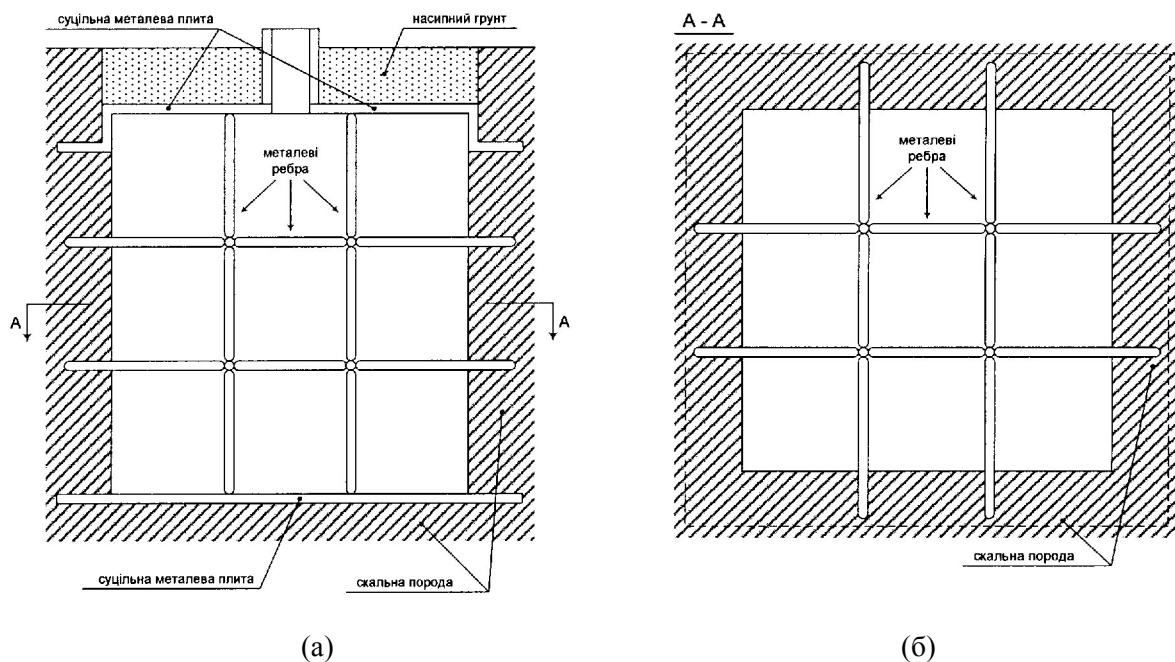


Рис. 2. Вертикальний (а) та горизонтальний (б) перерізи повітросховища з високим стисненням повітря у скальних породах

Оскільки, в останні кілька десятиріч років спостерігається значний прогрес у створенні полімерних конструкційних матеріалів, здатних витримувати значні циклічні механічні навантаження та значні перепади температур, то можна сподіватись, що в подальшій перспективі при створенні повітросховищ замість більшої частини металевих конструкцій можна буде використати полімерні.

Тепер розглянемо проблему встановлення силового обладнання на ПАЕС.

Для нагнітання повітря у повітросховища ПАЕС потрібні компресори, а для перетворення енергії стисненого у повітросховищі повітря в електроенергію потрібен комплекс «газова турбіна – генератор» [3].

Для гідроакумулюючих електростанцій (ГАЕС) давно вже створено оборотні гідроагрегати, в яких електрична частина одночасно може використовуватись і в якості приводного електродвигуна, і в якості електричного генератора, а гідравлічна частина може одночасно використовуватись і в якості гідравлічної турбіни, і в якості гідравлічного насоса. На жаль, для ПАЕС таких оборотних агрегатів ще не створено. Більше того, можливо, вони не будуть створені взагалі, оскільки процес перетворення енергії стисненого повітря в електроенергію і процес перетворення електроенергії в енергію стисненого повітря в ПАЕС суттєво відрізняються від процесу перетворення електроенергії в енергію, закачану у верхній басейн води, та процесу перетворення енергії води в електроенергію при її скиді з верхнього басейну у нижній в ГАЕС. Ця відмінність полягає, перш за все, в тому, що вода закачується у водосховище та спускається з нього без стискування і розширення та змін температури, а закачування повітря у повітросховище супроводжується збільшенням тиску і температури, а його випуск — зменшенням цих параметрів. Ця особливість приводить до того, що принцип дії і конструкції компресорів та газових турбін відрізняються суттєво [2] і у відомих варіантах суміщеними в одному оборотному агрегаті бути не можуть.

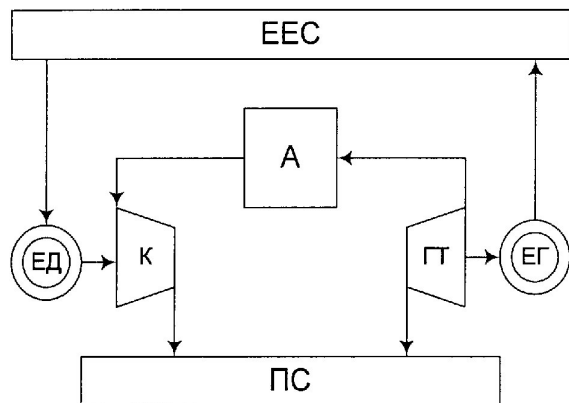


Рис. 3

Тож, станом на сьогодні, канал стиснення повітря, при подачі його через компресор у повітросховище ПАЕС із атмосфери, і канал випуску

стисненого повітря із повітросховища через газову турбіну в атмосферу можуть бути реалізовані лише роздільно. На рисунку 3 показано структурну схему комплексу: повітросховище (ПС) — канал стиснення повітря із атмосфери (А) компресором (К) — канал випуску стисненого повітря в атмосферу (А) через газову турбіну (ГТ) — електродвигун (ЕД), який перетворює електроенергію із електроенергетичної системи (ЕЕС) в механічну енергію руху компресора (К) — електричний генератор (ЕГ), який перетворює механічну енергію газової турбіни (ГТ) в електроенергію, що подається в електроенергетичну систему (ЕЕС).

З компресорами для ПАЕС проблеми не існує, оскільки промисловість їх випускає серійно різних модифікацій, різних потужностей і різних ступенів стиснення. Що ж стосується газових турбін, то на низькі тиски їх взагалі не виготовляють, а високотискові, які сконструйовані для газотурбінних станцій (ГТС), потребують таких значень температури повітря, які є недосяжними в великооб'ємних повітросховищах. Тому, доводиться констатувати, що промисловість сьогодні не здатна забезпечити попит на силові обладнання, необхідне для створення каналу перетворення енергії стисненого у повітросховищі повітря в механічну енергію обертання ротора електричного генератора.

Ми пропонуємо інший вихід, суть якого полягає в тому, що замість газової турбіни використовуватиметься вітрове колесо, на яке направлятиметься через сопло Лавалля повітряний потік з повітросховища. На рисунку 4 показано вертикальний переріз випускного тракту ПАЕС, де ПС – повітросховище, СЛ – сопло Лавалля, ВЕС-1 – вітрова електростанція з шестилопатеvim вітроколом, ВЕС-2 – вітрова електростанція з трилопатеvim колесом.

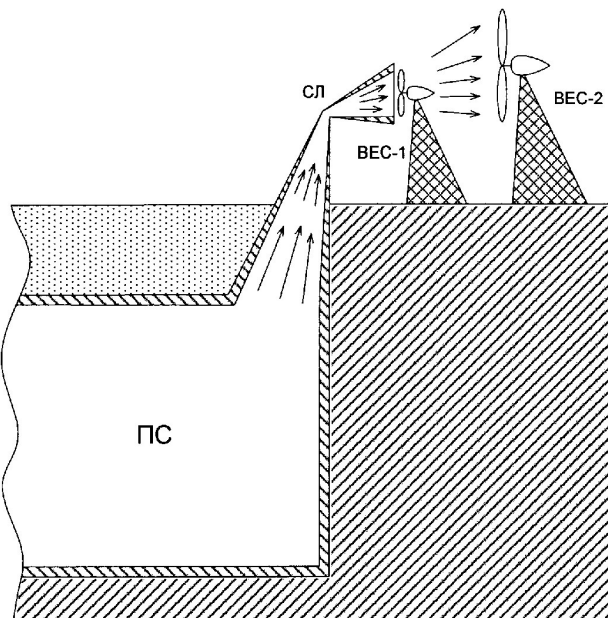


Рис. 4

При цьому, ми пропонуємо вітровий потік із повітросховища направляти соплом Лавалля не на одне вітроколесо, а на два, тобто, в комплексі з ПС з одним випускним соплом будувати в структурі ПАЕС не одну, а дві ВЕС. В якості вітроколеса ВЕС-1 можна використати 6-лопатеві пропелери діаметром 3,72 метра від літака АН-140, технологія виготовлення яких уже відпрацьована на «Авіанті», а в якості вітроколеса ВЕС-2 можна використати стандартні 3-лопатеві вітроколеса, які випускаються серійно за американською ліцензією на «Південмаші». При такій структурі ПАЕС «підземний вітер» буде використовуватись, на наш попередній погляд, найефективніше.

ВЕС-1 необхідно встановлювати так, щоб між випускним соплом ПАЕС та вітроколом ВЕС-1 відстань була мінімально-допустимою, а відстань між ВЕС-1 та ВЕС-2 доцільно встановлювати, виходячи з того, що, якщо на вітроколі ВЕС-1 швидкість повітряного потоку

задана в околі 15 м/с, то на вітроколі ВЕС-2 ця швидкість не повинна бути меншою, наприклад, 7 м/с.

Як відомо [2], швидкість на виході сопла Лавалля ми можемо визначити за допомогою рівняння нерозривності потоку

$$Gv = Cf, \quad (3)$$

де  $G$ ,  $v$  – витрати і об'єм газу, а  $C$  – швидкість газового потоку в перерізі  $f$ .

Відомо [2] також, що витрата газу пропорційна кореню квадратному з його тиску, тобто,

$$G \equiv \sqrt{P}. \quad (4)$$

Для стабілізації частоти струму, який генерується генератором ВЕС, на промисловому рівні 50 Гц необхідно підтримувати незмінною кутову швидкість обертання вітроколеса [3]. А це, в свою чергу, можливо здійснити або підтримуючи стабільною швидкість повітряного потоку, який подається на вітроколесо, або регулюючи кути нахилу лопатей вітроколеса, якщо швидкість повітряного потоку є змінною.

Із виразів (3), (4) легко бачити, що в процесі випускання повітря з повітросховища, який супроводжується падінням тиску, для підтримання стабільної швидкості газового потоку, що поступає на вітроколесо ВЕС-1, необхідно регулювати або об'єм сопла, або його поперечний переріз. А систему такого регулювання легше реалізувати, ніж систему зміни кута нахилу лопатей вітроколеса, яка уже є реалізованою. Тож задача розробки системи стабілізації швидкості повітряного потоку, який поступає із ПС на вітроколесо ВЕС, вже є задачею не науковою, а інженерною.

Тепер розглянемо економіко-математичну модель ЕЕС з ПАЕС, яка задана в роботі [1] формулами (1)—(11).

Очевидно, що для ПАЕС з високотисковими ПС ця модель ніяких змін не зазнає. Але для ПАЕС з низькотисковими ПС у цю модель зміни потрібно внести. Зазначимо, що сукупність математичних співвідношень (1)—(11) буде справедливою і при наявності низькотискових ПС, але з рівнянь (7) та (8) випадають окремі складові, а саме: з рівняння (7) для коефіцієнта корисної дії  $\eta_{AE}^*$  ЕЕС з ПАЕС випадає складова  $E_T^*$ , що характеризує частину теплової енергії, котра виділяється у ПС під час стиснення повітря, яка подається в теплову мережу; а з рівняння (8) для оцінки сумарної економічної ефективності  $\Delta S_{\Sigma}^*$  ПАЕС випадає складова  $\Delta S_{TM}$ , що характеризує економічну ефективність від використання споживачами частини теплової енергії, що виділяється в ПС під час стиснення повітря, та зростає складова  $\Delta S_{СП}$  за рахунок не отримання економічної ефективності від додаткового вирощування сільськогосподарської продукції в теплицях і парниках, які у цьому випадку не варто споруджувати.

### Висновки

1. Показано, які проблеми постають перед науковцями і конструкторами повітряних акумулюючих електростанцій при нинішніх обмеженнях на характеристики конструкційних матеріалів, необхідних для спорудження повітросховищ, та на характеристики силового обладнання, яке забезпечує перетворення енергії стисненого у повітросховищах повітря в електроенергію, що подається в електроенергетичну систему.

2. Запропоновано варіанти функціональних схем ПАЕС з застосуванням як високотискових ПС, так і низькотискових.

3. Дано оцінку способів реалізації систем автоматичної стабілізації частоти струму генератора ВЕС.

4. Показано, які зміни необхідно внести в економіко-математичні моделі комплексів ЕЕС-ПАЕС, щоб їх можна було застосовувати і до ПАЕС з низькотисковими ПС.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мокін Б. І. Екологічні та економічні аспекти створення повітряних акумулюючих станцій // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2006. — № 5. — С. 95–103.
2. Чепурний М. М., Ткаченко С. Й. Основи технічної термодинаміки. — Вінниця: Поділля-2000. — 2004. — 352 с.
3. Астахов Ю. Н., Веников В. А., Тер-Газарян А. Г. Накопители энергии в электрических системах. — М.: Высшая школа. — 1989. — 159 с.

Рекомендована кафедрою моделювання та моніторингу складних систем

Надійшла до редакції 30.06.07  
Рекомендована до друку 02.07.07

**Мокін Борис Іванович** — професор кафедри, **Мокін Олександр Борисович** — доцент кафедри.  
Кафедра моделювання та моніторингу складних систем, Вінницький національний технічний університет