

УДК 620.91+621.311.24

**Б. І. Мокін, д. т. н., проф.; М. М. Чепурний, к. т. н., доц.; О. Б. Мокін, к. т. н.****ПОВІТРЯНА АКУМУЛЮЮЧА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ З ДВОМА  
ПОВІТРОСХОВИЩАМИ РІЗНОГО ТИСКУ**

*Запропонована структура повітряної акумулюючої електростанції з двома повітросховищами різного тиску, сполученими між собою компресорно-детандерним агрегатом. Визначені основні характеристики цього класу електростанцій та методика їх розрахунку.*

*Ключові слова:* енергозбереження, вітроенергетика, акумулююча електростанція, повітросховище.

**1. Постановка задачі**

Чим далі відходить в історію дата трагедії на Чорнобильській АЕС і чим точнішими стають прогнози щодо обмеженості обсягів природного газу в земних надрах, тим більшої інтенсивності в багатьох країнах набуває розбудова нових атомних електростанцій, характерною особливістю яких є необхідність функціонування цілодобово в базовому режимі.

У програму енергозабезпечення України до 2020 року також закладена побудова кількох нових АЕС. Тож для України, як і для всіх інших країн, що планують нарощувати генерацію електричної енергії на АЕС, постає проблема – куди подіти вироблену електроенергію в години нічних провалів навантаження?

Одним із добре відпрацьованих як у теоретичному, так і практичному планах методів використання надлишкової в цей момент електроенергії є акумуляція її на гідроакумулюючих електростанціях (ГАЕС) шляхом закачування води з нижнього водосховища у верхнє [1]. Але цей підхід немає ніяких перспектив бути використаним на великих за площею рівнинних територіях. Тож в Україні, наприклад, окрім невеликої діючої Київської ГАЕС, Ташлицької ГАЕС, на якій поки що введено в роботу лише перший агрегат, та Дністровської ГАЕС, перспективи завершення будівництва якої нікому не відомі, будівництво нових ГАЕС ніякими планами на майбутнє не передбачається.

Але ж навіть коли усі ці три ГАЕС запрацюють на повну потужність, вони зможуть у години провалу навантаження акумулювати електроенергію в кількості, не більшій половини тієї, яка виробляється сьогодні на Запорізькій АЕС. А що ж робити в ці години будемо з тією електроенергією, яка вироблятиметься на усіх інших, у тому числі й у майбутньому побудованих, АЕС?

Ми пропонуємо акумулювати цю надлишкову електроенергію у вигляді стисненого повітря, закачаного у повітросховища, в якості яких можна використовувати як відпрацьовані газові свердловини, залізородні та вугільні шахти, так і карстові печери та відпрацьовані кар'єри [2, 3].

Як показано в наших роботах [2, 3], при використанні повітряних акумулюючих електростанцій (ПАЕС) екологія навколишнього середовища не лише не погіршується, як це має місце при використанні ГАЕС, а навпаки, поліпшується.

Основним недоліком ПАЕС, розрахунок характеристик експериментального зразка якої здійснено у роботі [4], а техніко-економічний аналіз – у роботі [2], є низький коефіцієнт корисної дії, зумовлений тим, що лише незначна частка електроенергії, яка була використана для стиснення повітря компресорами в повітросховищі, повертається назад в електроенергію в процесі випуску цього стисненого повітря через газову турбіну (детандер) у навколишнє середовище.

Але виявилось, що коефіцієнт корисної дії ПАЕС можна суттєво збільшити, якщо

відпрацьоване повітря випускати із повітросховища високого тиску через газову турбіну не в навколишнє середовище, а випускати його через детандер у інше, теж ізольоване, повітросховище нижчого тиску, з якого потім під час провалу навантаження на АЕС компресорами перекачувати повітря, використовуючи надлишок електроенергії в електричній мережі, назад у повітросховище високого тиску.

Розробці структури такої ПАЕС з двома повітросховищами і розрахунку її характеристик присвячена ця робота.

## 2. Структура ПАЕС з двома повітросховищами

Як уже нами зазначено вище, за аналогією з ГАЕС пропонуємо і ПАЕС виконувати з двома резервуарами, якими є повітросховища високого (ПС1) і низького (ПС2) тиску. Структура такої ПАЕС показана на рис. 1, де також позначені параметри повітря (тиск  $P$ , температура  $t$ , об'єм  $V$ ) в характерних елементах схеми.

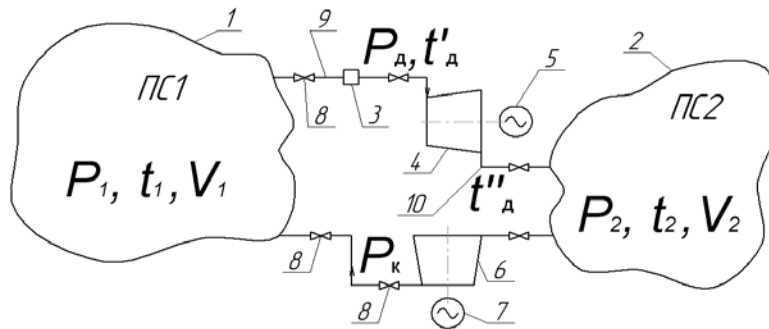


Рис. 1. Структурна схема ПАЕС з двома повітросховищами:

- 1 – повітросховище високого тиску ПС1; 2 – повітросховище низького тиску ПС2;  
3 – регулятор тиску; 4 – детандер; 5 – електрогенератор; 6 – осьовий компресор;  
7 – електродвигун; 8 – запірні арматури

Між повітросховищами високого тиску ПС1 і низького тиску ПС2 розташована компресорно-детандерна станція, до складу якої входять: компресори 6 з електроприводами 7; регулятор тиску 3; детандери (повітряні турбіни) 4 з електрогенераторами 5; запірні арматури 8 на лініях високого 9 і низького 10 тиску, відповідно.

Під час роботи ПАЕС у режимі генерації електроенергії повітря із повітросховища ПС1 через регулятор тиску 3 з тиском  $P_0$  спрямовується на детандери. У детандерах, завдяки розширенню і виконанню механічної роботи обертання вала, параметри повітря зменшуються до значень  $P_2$  і  $t''_d$ . Відпрацьоване в детандерах повітря спрямовується в повітросховище ПС2. В години “провалу” навантаження електромережі повітря із ПС2 перекачується в ПС1 компресорами.

## 3. Розрахунок характеристик ПАЕС

Згідно з даними роботи [1] “піковість” електроспоживання спостерігається двічі на добу в ранішні та вечірні години. За таких умов період між пусками ПАЕС може складати від 5 до 7 годин. Зрозуміло, що в міжпусковий період повітря в повітросховищах буде охолоджуватись. Інтенсивність охолодження повітря залежить від різниці температур між повітрям і стінками повітросховища. Будемо виходити з того, що зниження температури повітря в ПС1 складатиме  $50-60^\circ\text{C}$ , а в ПС2 –  $10-20^\circ\text{C}$ .

Розглянемо особливості роботи ПАЕС. Ефективність роботи ПАЕС будемо оцінювати за допомогою коефіцієнта використання енергії  $\eta_e$ , який є відношенням енергії, що відпущена в електромережу детандер-генераторними агрегатами (ДГА), до енергії, яка спожита

приводами компресорів у процесі заповнення повітрям ПС1, тобто

$$\eta_e = E_\delta / E_\kappa = N_\delta \cdot \tau_\delta / (N_\kappa \cdot \tau_\kappa), \quad (1)$$

де  $E_\delta$  і  $E_\kappa$  – відпущена і спожита електроенергія, відповідно;  $N_\delta$  і  $N_\kappa$  – потужність ДГА і компресорів;  $\tau_\delta$  і  $\tau_\kappa$  – термін роботи детандерів і компресорів.

У формулі (1) значення потужностей  $N_\delta$  і  $N_\kappa$  дорівнюють:

$$N_\delta = G_\delta \cdot C_p (t'_\delta - t''_\delta) \eta_{em}, \quad N_\kappa = G_\kappa \cdot C_p (t_\kappa - t_2) / \eta_{em}, \quad (2)$$

де  $G_\delta$  та  $G_\kappa$  – масова витрата повітря в детандерах і компресорах, відповідно;  $C_p$  – масова ізобарна теплоємність повітря;  $t'_\delta$  і  $t''_\delta$  – температура повітря на вході в детандер і на виході з нього;  $t_2$  і  $t_\kappa$  – температура повітря перед компресором і на виході з нього;  $\eta_{em}$  – електромеханічний ККД.

Абсолютні температури повітря за компресором і детандером визначаються за відомими формулами [5]:

$$t_\kappa = t_2 [1 + (\lambda^m - 1) / \eta_\kappa], \quad (3)$$

$$t''_\delta = t'_\delta [1 - (1 - \beta^{-m}) / \eta_\delta]. \quad (4)$$

У цих формулах позначено:  $\lambda = P_\kappa / P_2$ ;  $\beta = P_\delta / P_2$ ;  $\eta_\kappa$  і  $\eta_\delta$  – ККД компресора і детандера, відповідно;  $P_2$  і  $P_\kappa$  – тиск повітря до і після компресора;  $m = (k - 1) / k$ ;  $k = 1,4$  – показник адіабати для повітря;  $P_\delta$  – тиск повітря перед детандером.

Маса повітря в ПС1 після його заповнення і часткового спорожнення [5]:

$$M_1 = P_1 \cdot V_1 / (R \cdot t_1); \quad M_2 = P_\delta \cdot V_1 / (R \cdot t'_\delta), \quad (5)$$

де  $P_1$  і  $V_1$  – тиск повітря в ПС1 та об'єм ПС1, відповідно;  $R$  – газова стала повітря.

Масова витрата повітря в компресорах і детандерах,  $кг/с$ :

$$G_\kappa = (M_1 - M_2) / (3600 \cdot \tau_\kappa) = \Delta M / (3600 \cdot \tau_\kappa); \quad (6)$$

$$G_\delta = (M_1 - M_2) / (3600 \cdot \tau_\delta) = \Delta M / (3600 \cdot \tau_\delta).$$

Працездатність ПАЕС можна оцінювати за допомогою коефіцієнта, що характеризує виробництво енергії в ДГА кожною тонною витраченого повітря,  $кВт \cdot год/т$ , тобто

$$e = E_\delta / (\Delta M \cdot 10^{-3}). \quad (7)$$

Нами досліджувалась робота ПАЕС для режимів, у яких тиск повітря в ПС1 не перевищував  $5 \text{ МПа}$ . Для стиснення і перекачування повітря із ПС2 в ПС1 був вибраний компресор для газотурбінної установки ГТ-750-6 з мірою підвищення тиску  $\lambda = 4,6$  і масовою витратою  $G_\kappa = 52,7 \text{ кг/с}$  [6]. При цьому було прийнято, що в міжпусковий період зменшення температури повітря в ПС1 складало  $60^\circ\text{C}$ , а в ПС2 –  $20^\circ\text{C}$ . Втрати тиску в повітропроводах оцінювались в  $0,1 \text{ МПа}$ , а зниження температури в них – в  $10^\circ\text{C}$ . При цьому ККД механізмів становили: компресора –  $0,84$ ; детандерів –  $0,8$ ; електромеханічного –  $0,96$ . Тривалість роботи компресора –  $5 \text{ год.}$ , а тривалість роботи детандерів –  $2 \text{ год.}$  Розрахунки здійснювались за умови, що об'єм ПС1 складав  $10^5 \text{ м}^3$ . У розрахунках варіювалась величина тиску  $P_2$  в ПС2, від якої залежить як значення тиску в ПС1, так і масова витрата повітря із ПС1.

Для фіксованої міри підвищення тиску в компресорі  $\lambda$  температура повітря за компресором і питома робота компресора залишаються сталими. Зі збільшенням міри Наукові праці ВНТУ, 2008, № 1

пониження тиску в детандері  $\beta$  питома робота детандера дещо зростає. Однак разом з тим зростає необхідний тиск перед детандером ( $P_0 = P_2 \cdot \beta$ ), а також маса залишеного повітря  $M_2$  в ПС1. Останнє зумовлює зменшення витрат повітря із ПС1, що, у свою чергу, зменшує виробництво електроенергії в ДГА. Тому, насамперед, необхідно з'ясувати вплив  $\beta$  на основні показники роботи ПАЕС. У табл. 1 наведені результати розрахунків показників роботи ПАЕС для  $\lambda = 4,6$ ;  $P_2 = 1 \text{ МПа}$ ;  $T_2 = 278 \text{ К}$ .

Таблиця 1

Вплив міри зниження тиску в детандерах на показники роботи ПАЕС

Показники	Значення $\beta$				
	2,6	2,8	3	3,2	3,4
Температура повітря, $K$ :					
- за компресором;	459	459	459	459	459
- перед детандером;	379	371	379	379	379
- за детандером.	306	301	297	293	289,5
Масова витрата повітря, $кг/с$ :					
- в компресорі;	61,2	51	40,77	30,5	20,34
- в детандері.	153	127,46	101,94	76,24	50,87
Потужність, $МВт$ :					
- компресора;	11,6	9,66	7,73	5,76	3,85
- детандера.	10,72	9,34	8,025	6,31	4,36
Споживана електроенергія, $МВт \cdot год$	58	48,33	38,65	28,8	19,29
Вироблена електроенергія, $МВт \cdot год$	21,44	19,08	16,05	12,62	8,72
Коефіцієнт використання енергії	0,37	0,395	0,415	0,438	0,452

Із табл. 1 видно, що зі зменшенням  $\beta$  збільшується витрата повітря в компресорах і детандерах, що призводить до збільшення їх потужності та виробництва електроенергії, але й водночас – до зменшення коефіцієнта використання енергії на ПАЕС. Це наочно видно на рис. 2, де показана зміна величин  $\eta_e$  і  $N_D$ .

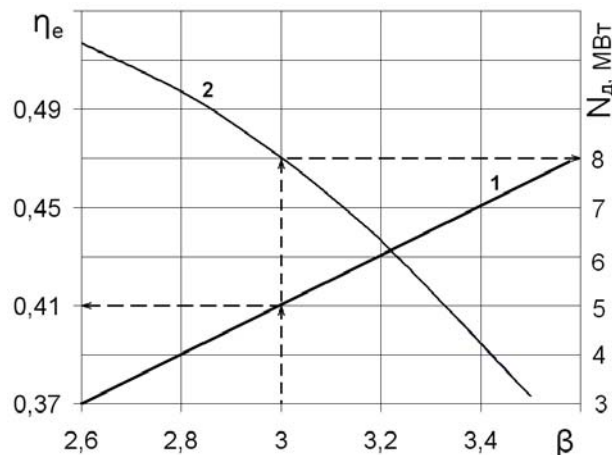


Рис. 2. Геометрична інтерпретація характеру зміни коефіцієнта використання енергії на ПАЕС і потужності ДГА: 1 –  $\eta_e = f(\beta)$ ; 2 –  $N_D = f_1(\beta)$ .

Отримані результати дають змогу вибирати оптимальне значення  $\beta$  для конкретної ПАЕС. Під час цього вибору необхідно враховувати кількість установлених ДГА. Зрозуміло, що менша їх кількість зумовлює зменшення капіталовкладень у тепломеханічне Наукові праці ВНТУ, 2008, № 1

устаткування ПАЕС. Типорозмірний ряд ДГА, які виготовляються енергомашинобудівними підприємствами, за потужністю становить: 1,5; 2,5; 4; 6 і 12 *MВт* [7]. З огляду на це, найбільш доцільним значенням міри зниження тиску в детандері для заданого об'єму  $V_1$  можна вважати  $\beta = 3,2$ , для якого  $N_{\partial} = 6,31$ ;  $\eta_e = 0,438$ .

З'ясуємо тепер вплив тиску  $P_2$  в ПС2 на показники роботи ПАЕС для заданих і обчислених параметрів:  $\lambda = 4,6$ ;  $\beta = 3,2$ ;  $t_k = 459 K$ ;  $t'_{\partial} = 379 K$ ;  $t''_{\partial} = 293 K$ ;  $t_2 = 278 K$ . Результати варіантних розрахунків за викладеною вище методикою зводимо в табл. 2.

Таблиця 2

Вплив тиску повітря в ПС2 на показники роботи ПАЕС

Показники	Значення тиску $P_2$ , МПа				
	0,6	0,7	0,8	1	1,1
Тиск повітря за компресором, МПа	2,76	3,22	3,68	4,6	5,06
Тиск повітря перед детандером, МПа	1,92	2,24	2,56	3,2	3,52
Витрачена маса повітря ( $M_2 \cdot 10^{-5}$ кг)	3,745	4,38	5,02	5,5	6,13
Потужність компресора, МВт	3,92	4,58	5,25	5,75	6,42
Потужність детандера, МВт	4,29	5,02	5,75	6,31	7,028
Споживана електроенергія, МВт·год	19,6	22,93	26,28	28,8	32,09
Вироблена електроенергія, МВт·год	8,58	10,04	11,51	12,62	14,05
Коефіцієнт використання енергії	0,438	0,438	0,438	0,438	0,438
Питоме виробництво енергії тонною повітря, кВт·год/тонну	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9
Відношення об'єму ПС2 до об'єму ПС1	0,527	0,527	0,527	0,462	0,468

Дані в табл. 2 свідчать про те, що для фіксованих значень  $\lambda$  і  $\beta$  температури повітря за компресором, до і після детандера залишаються сталими, внаслідок чого величина питомої роботи в цих агрегатах також залишається незмінною. Зміна потужностей компресора і детандера зумовлена тільки зміною масової витрати повітря в період роботи ПАЕС. За умови роботи ПАЕС з вибраним значенням міри зменшення тиску в детандері ( $\beta = 3,2$ ) її ефективність та працездатність практично не залежить від тиску повітря в ПС2. Слід зазначити, що робота ПАЕС з  $\beta = 3,2$  відрізняється достатнім виробництвом електроенергії з мінімумом ДГА, а також меншим значенням необхідного об'єму повітросховища зниженого тиску.

У наших розрахунках коефіцієнт дії компресора  $\eta_k$  досить наближений до реального значення. Проте ККД детандера може в той чи інший бік дещо відрізнитись від вибраного. Тому на рис. 3 наведені значення поправочного коефіцієнта  $K_{\partial}$ , на який треба помножити величини  $N_{\partial}$ ,  $E_{\partial}$  і  $\eta_e$  в разі, коли  $\eta_{\partial}$  не дорівнює 0,8.

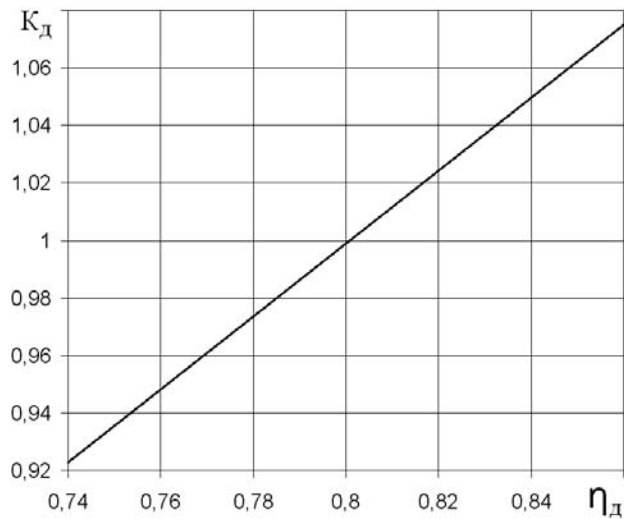


Рис. 3. Графік залежності значення поправочного коефіцієнта  $K_d$  від  $\eta_d$ .

Зауважимо також, що для створення ПАЕС можна використовувати багатоступінчасті осьові компресори газотурбінних установок інших типів, в яких міра підвищення тиску на кожному ступені  $\lambda_1$  складає, як правило, 1,245-1,25. Так, наприклад, застосування семиступінчастого компресора з  $\lambda_1 = 1,245$  дає загальну міру підвищення тиску  $\lambda = 4,63$ . Слід зазначити, що для збільшення порівняно невеликого виробництва електроенергії на ПАЕС необхідно збільшувати об'єми повітросховищ ПС1 і ПС2.

Незважаючи на те, що розрахунки здійснювались за умови експлуатації реально існуючого тепломеханічного устаткування, отримані результати не можна вважати остаточними, оскільки температури повітря в повітросховищах можуть в реальних умовах дещо відрізнитись від вибраних. Однак ці результати є необхідною передумовою для прогнозування показників роботи ПАЕС різної потужності та різними параметрами повітря в схемі.

#### 4. Висновки

1. Запропонована нова структура ПАЕС з двома повітросховищами різного тиску ПС1 та ПС2, сполученими між собою компресорно-детандерним агрегатом.
2. Отримані основні характеристики роботи ПАЕС з двома повітросховищами різного тиску.
3. За умови, що тиск у повітросховищі високого тиску ПС1 не перевищує  $5 \text{ МПа}$ , виявлена найбільш прийнятна міра зниження тиску в детандері, яка становить 3,2 і забезпечує роботу ПАЕС з однаковою ефективністю для всіх значень тисків повітря в повітросховищі ПС2 зниженого тиску.
4. Показано, що для збільшення виробництва електроенергії на ПАЕС необхідно або збільшувати об'єм повітросховищ, або збільшувати тиск у повітросховищі високого тиску.
5. Отримані передумови для здійснення техніко-економічних розрахунків при проектуванні ПАЕС запропонованого типу.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковецкий В. М., Ковецкая М. М. Альтернатива гидроаккумулирующим пиковым электростанциям в Украине // Проблемы загальної енергетики. – 2001. – № 5. – С. 16 – 19.
2. Мокін Б. І. Екологічні та економічні аспекти створення повітряних акумулюючих електростанцій // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 5. – С. 95 – 103.
3. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Особливості побудови та функціонування повітряних акумулюючих

електростанцій на Криворіжжі // Вісник Криворізького технічного університету. – 2007. – № 18. – С. 116 – 119.

4. Дослідницькі варіанти побудови повітряної акумулюючої електростанції та їх обґрунтування [Електронний ресурс] / Мокін Б. І., Чепурний М. М., Мокін О. Б. // Електронне науково-спеціалізоване видання «Наукові праці Вінницького національного технічного університету» англ., рос. та укр. мовами. – 2007. – Вип.1. – Розділ: Енергетика та електротехніка. – С. 1 – 5. – Адреса: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/vyp1ru.html>

5. Чепурний М. М., Ткаченко С. Й. Основи технічної термодинаміки. – Вінниця: Поділля-2000. – 2004. – 353 с.

6. Теплотехнический справочник / Под ред. В. Н. Юренева и П. Д. Лебедева. – М.: Энергия. – 1985. – Т.1. – 743 с.

7. Газораспределительные детандер-генераторные агрегаты мощностью 1500-12000 кВт производства ОАО «ТКЗ» для энергосберегающих технологий. – Режим доступу: <http://www.inno.ru/project/15533/>

**Мокін Борис Іванович** – професор кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, ректор;

**Чепурний Марко Миколайович** – доцент кафедри теплоенергетики;

**Мокін Олександр Борисович** – доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

Вінницький національний технічний університет.