

Корисна модель належить до теплоенергетики, зокрема стосується турбоустановки з надкритичним CO₂ для двоконтурної атомної електричної станції.

Найбільш відповідною областю використання атомної енергії стала електроенергетика. Виробництво електроенергії на атомних електростанціях найчастіше здійснюється за допомогою паротурбінних установок. Основний шлях отримання електроенергії на сучасних АЕС - використання електричних генераторів машинного типу з механічним приводом від парової турбіни.

За двоконтурною схемою працюють всі АЕС України, основу яких складають ядерні енергетичні реактори з водою під тиском ВВЕР-1000 [1].

Робочою речовиною турбіни водо-водяного реактора є вода. Атомна електрична станція містить реактор з парогенератором, парову турбіну з генератором і конденсатором, водосховище-охолоджувач [2]. Використання надкритичного CO₂ в турбоустановці замість води забезпечує численні переваги. Перевагами циклу Брайтона з надкритичним CO₂ є висока ефективність в області помірної температури на вході в турбіну та невелика площа установки з простим компонуванням, компактними турбомашинами та теплообмінниками. Відомі турбомашини в яких робочою речовиною є надкритичний CO₂ [3-11]. У патентах [3-6] наведені конструктивні особливості турбін та детандер-генераторів, у патентах [7-11] наведені конструктивні особливості турбокомпресорів. Згідно з патентом [7] система містить: робочу рідину; джерело тепла для подачі тепла до зазначеної робочої рідини; турбокомпресор. Турбокомпресор має центральну вісь обертання і включає: пару корінних підшипників, обертовий вал, турбіну, відцентровий компресор. Робочою рідиною у системі може бути надкритичний вуглекислий газ. Джерелом тепла може бути ядерний реактор. У патенті [10] розглядаються особливості конструкції одновальної турбомашини, яка містить турбіну, генератор і компресор. Недоліком вказаних аналогів є втрата тепла, яке відводиться від потоку газу в навколишнє середовище перед стисканням газу відцентровим компресором.

Найбільш близьким аналогом до заявленої корисної моделі є патент [11] (Patent CN1 12267919A. A supercritical carbon dioxide extended cycle power generation system and method). У цьому винаході пропонується система генерації електроенергії з циклом розширення вуглекислого газу в надкритичному стані, що містить: охолоджувач, головний компресор, регенератор, тепловідвідник, головний детандер (турбіну), субдетандер, попередній компресор, джерело охолодження та джерело тепла. Недоліком цього аналога є втрата тепла, яке відводиться від потоку газу перед стисканням газу компресором.

Технічною задачею, на вирішення якої спрямована корисна модель, є оснащення турбоустановки додатковим замкнутим контуром з робочою речовиною з низьким значенням температури кипіння. Додатковий контур містить теплообмінник, турбіну, насос, електрогенератор, конденсатор. У цьому контурі реалізується органічний цикл Ренкіна (ORC).

Поставлена задача вирішується тим, що до атомної електричної станції, яка містить: реактор; теплообмінник, у якому теплота від теплоносія першого контуру реактора передається надкритичному CO₂; турбіну, електричний генератор, теплообмінник, у якому охолоджується надкритичний CO₂ перед надходженням у компресор; компресор, додатково включено модуль органічного циклу Ренкіна, який містить теплообмінник, турбіну, насос, електрогенератор, конденсатор. Технічний результат полягає в отриманні додаткової електроенергії з низькопотенційного тепла, що дає підвищення енергетичної ефективності атомної електричної станції.

Перелік фігур креслень. На фіг. 1 зображено схема турбоустановки з надкритичної CO₂. Позначення на фіг. 1: Р - реактор; ТО1 - теплообмінник, в якому теплота від теплоносія першого контуру реактора передається надкритичному CO₂; ТО2 теплообмінник (рекуператор); ТО3 теплообмінник, в якому теплота від надкритичного CO₂ передається робочій речовині органічного циклу Ренкіна; ТО4 - теплообмінник (конденсатор); Т1 - турбіна циклу CO₂; Т2 - турбіна циклу ORC; К1 - компресор циклу CO₂; ЕГ1 - електрогенератор циклу CO₂; ЕГ2 - електрогенератор циклу ORC; Н2 - насос циклу ORC; ORC - органічний цикл Ренкіна.

На фіг. 2 - цикл Брайтона в T-s діаграмі для турбоустановки з надкритичним CO₂. Позначення на фіг. 2: 1-2 процес розширення надкритичного CO₂ в турбіні; 2-3 процес зменшення температури надкритичного CO₂ у рекуперативному теплообміннику; 3-4 процес зменшення температури надкритичного CO₂ шляхом відводу тепла до охолоджувального середовища; 4-5 процес стискання надкритичного CO: у компресорі; 5-6 процес підвищення температури надкритичного CO₂ у рекуперативному теплообміннику; 6-1 процес підвищення температури надкритичного CO₂ шляхом відводу тепла від теплоносія першого контуру реактора.

На фіг. 3 органічний цикл Ренкіна (ORC) для фреону R134a: а) 30 °C і б) 15 °C. Позначення на фіг. 3: 1-2 - процес розширення парів фреону в турбіні; 2-3 - конденсація парів фреону; 3-4 - підвищення тиску фреону за допомогою насоса; 4-5 - підігрів фреону; 5-1 - випаровування фреону та перегрів.

Робота атомної електричної станції здійснюється наступним чином:

Під час розширення газу в турбіні Т1 виконується робота і турбіна обертає ротор електрогенератора ЕГ1. Процес розширення надкритичного CO₂ в турбіні наведений на фіг.2 (процес

1-2). Після турбіни надкритичний CO₂ по трубопроводу 2 надходить в теплообмінник (рекуператор) TO2, де температура CO₂ зменшується. Процес зменшення температури надкритичного CO₂ у рекуперативному теплообміннику наведений на фіг. 2 (процес 2-3). По трубопроводу 3 газ надходить в теплообмінник TO3, в якому теплота від надкритичного CO₂ передається робочій речовині органічного циклу Ренкіна (фіг. 2, процес 3-4). З теплообмінника TO3 охолоджений газ по трубопроводу 4 надходить до компресора K1, у якому тиск газу підвищується до потрібного значення (фіг. 2, процес 4-5). Потім по трубопроводу 5 надкритичний CO₂ надходить в теплообмінник (рекуператор) TO2, де його температура підвищується (фіг. 2, процес 5-6). По трубопроводу 6 надкритичний CO₂ надходить в теплообмінник TO1, в якому теплота від теплоносія першого контуру реактора Р передається надкритичному CO₂ (фіг. 2, процес 6-1).

Робочими речовинами для органічного циклу Ренкіна (ORC) є речовини з низьким значенням температури кипіння, зокрема фреони, водний розчин аміаку, пентан, ізопентан, бутан, ізобутан та інші [12].

Робота органічного циклу Ренкіна здійснюється наступним чином:

Фреон стискається за допомогою насоса Н2 (фіг. 3, процес 3-4). Потім підігрівається та випаровується у теплообміннику TO3 за рахунок тепла надкритичного ССЬ (фіг. 3, процес 4-5 і 5-1). Фреон надходить у турбіну Т2. Під час розширення газу в турбіні виконується робота і турбіна обертає ротор електрогенератора ЕГ2. Процес розширення фреону в турбіні наведений на фіг. 3 (процес 1-2). Пара фреону конденсується у конденсаторі TO4 (фіг. 3, процес 2-3) і надходить у насос Н2.

Відомості, які підтверджують можливість здійснення корисної моделі.

Для порівняльної оцінки енергетичної ефективності були виконані розрахунки станцій з різними паротурбінними установками (ПТУ). Розрахунки виконані для енергетичної системи з модульним реактором потужністю 15 МВт. Температура пари на вході в турбіну прийнята 550 °С, тиск пари на виході з турбіни - 0,05 МПа. Прийнято, що на виході з турбіни пара не має бути вологою. Параметри пари у характерних точках циклу визначені за допомогою RefProp.

Виконані розрахунки турбоустановки з надкритичним CO₂. Зроблені розрахунки енергосистем з використанням органічного циклу Ренкіна (ORC).

1. ПТУ з водяною парою

Розглянути такі ПТУ: з докритичною парою без проміжного перегріву; із проміжним перегрівом з докритичною та надкритичною парою; з теплофікаційною турбіною.

1.1 ПТУ з докритичною парою без проміжного перегріву

На вході в турбіну тиск дорівнює P=5 МПа, температура - T=550 °С.

Для цих умов теоретична потужність електрогенератора N_e=4428 кВт.

Енергетична ефективність атомної станції з турбіною з докритичною парою без проміжного перегріву дорівнює

$$\frac{N_e \cdot \eta_{\text{мехТ}} \cdot \eta_{\text{ег}}}{N_p} = \frac{4428 \cdot 0,98 \cdot 0,98}{15000} \cdot 100 = 28,4 \%$$

1.2 ПТУ з проміжним перегрівом

На вході в турбіну тиск дорівнює P=28 МПа, температура - T=550 °С.

Теоретична потужність електрогенератора N_e=5579 кВт.

Використання проміжного перегріву суттєво підвищує потужність турбіни.

Енергетична ефективність атомної станції з ПТУ з проміжним перегрівом дорівнює

$$\frac{N_e \cdot \eta_{\text{мехТ}} \cdot \eta_{\text{ег}}}{N_p} = \frac{5579 \cdot 0,98 \cdot 0,98}{15000} \cdot 100 = 35,7 \%$$

1.3 ПТУ з теплофікаційною турбіною

На вході в турбіну тиск дорівнює P=28 МПа, температура - T=550 °С.

Температура пари на виході з турбіни дорівнює 160 °С. Ця пара може забезпечити нагрів води до температури 100-130 °С. Температура пари після теплообмінника - 112 °С.

Теплова потужність підігрівача води при ΔT=48 °С дорівнює Q̇ = 794 кВт.

Теоретична потужність електрогенератора N_e=4928 кВт.

Сумарна потужність складає 4928+794=5722 кВт.

Енергетична ефективність атомної станції з теплофікаційної ПТУ з проміжним перегрівом дорівнює

$$\frac{N_e \cdot \eta_{\text{мехТ}} \cdot \eta_{\text{ег}}}{N_p} = \frac{5722 \cdot 0,98 \cdot 0,98}{15000} \cdot 100 = 36,6 \%$$

2 Турбоустановка з надкритичним CO₂ (s-CO₂)

Енергетичний цикл S-CO₂ має високу ефективність в діапазоні робочих температур реактора Gen IV, кращу стабільність зі звичайними конструкційними матеріалами.

Розрахунок виконаний для таких параметрів на вході турбіни: температура 530 °С, тиск 14 МПа.

Теоретична потужність електрогенератора N_e=5813 кВт.

Енергетична ефективність атомної станції з турбоустановкою з надкритичним CO₂ дорівнює

$$\frac{N_e \cdot \eta_{\text{мехТ}} \cdot \eta_{\text{ег}}}{N_p} = \frac{5813 \cdot 0,98 \cdot 0,98}{15000} \cdot 100 = 37,2 \%$$

Органічний цикл Ренкіна дозволяє отримати додаткову електроенергію з низкопотенційного тепла. Розрахунки органічного циклу Ренкіна виконані для робочої речовини R134a (тетрафторетан CF₃CFH₂) і CO₂.

Тепло з циклу s-CO₂ передається робочій речовині циклу ОРЦ у теплообміннику. Температура CO₂ на вході в теплообмінник 100 °С, на виході 35 °С.

Тепловий потік на ділянці циклу Брайтона 3-4: $\dot{Q}_1 = 9010 \text{ кВт}$.

2.1 Робоча речовина органічного циклу Ренкіна - R134a

а) 30 °С

Потужність турбіни $N_T = 957 \text{ кВт}$.

Енергетична ефективність атомної станції з турбоустановкою з надкритичним CO₂

$$\frac{N_e \cdot \eta_{\text{мехТ}} \cdot \eta_{\text{ег}}}{N_p} = \frac{(5813957) \cdot 0,98 \cdot 0,98}{15000} \cdot 100 = 43,3 \%$$

Використання ORC підвищує енергетичну ефективність турбоустановки з надкритичним CO₂ на 14 %.

Наведені розрахунки підтверджують, що використання органічного циклу Ренкіна (ORC) суттєво підвищує ефективність атомних станцій [13].

Підвищення температури і тиску s-CO₂ дозволяє досягнути енергетичної ефективності атомних станцій більш 50 %.

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ:

1. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Книга 4: Розвиток атомної енергетики та об'єднаних енергосистем / С.Г. Плачкова та інші. - Київ, 2013. - 303 с.

2. Патент 125692. Атомна електрична станція. Інститут технічної теплофізики НАН України [UA]. 2022.

3. Patent US 8,893,499 B2. Advanced super-critical expander-generator. 2014.

4. Patent EP 2 798 159 B1. Advanced super-critical CO₂ expander-generator. European patent specification. 2018.

5. Patent US 2018/0328210 A1. Super-critical CO₂ expander. 2018.

6. Patent EP 3 929 411 A1. Supercritical CO₂ turbine. European patent application. 2021.

7. Patent US 9,039,349 B2. Turbocompressor and system for a supercritical-fluid cycle. 2015.

8. Patent CN106089435A. A kind of compressor system with supercritical carbon dioxide as working medium.

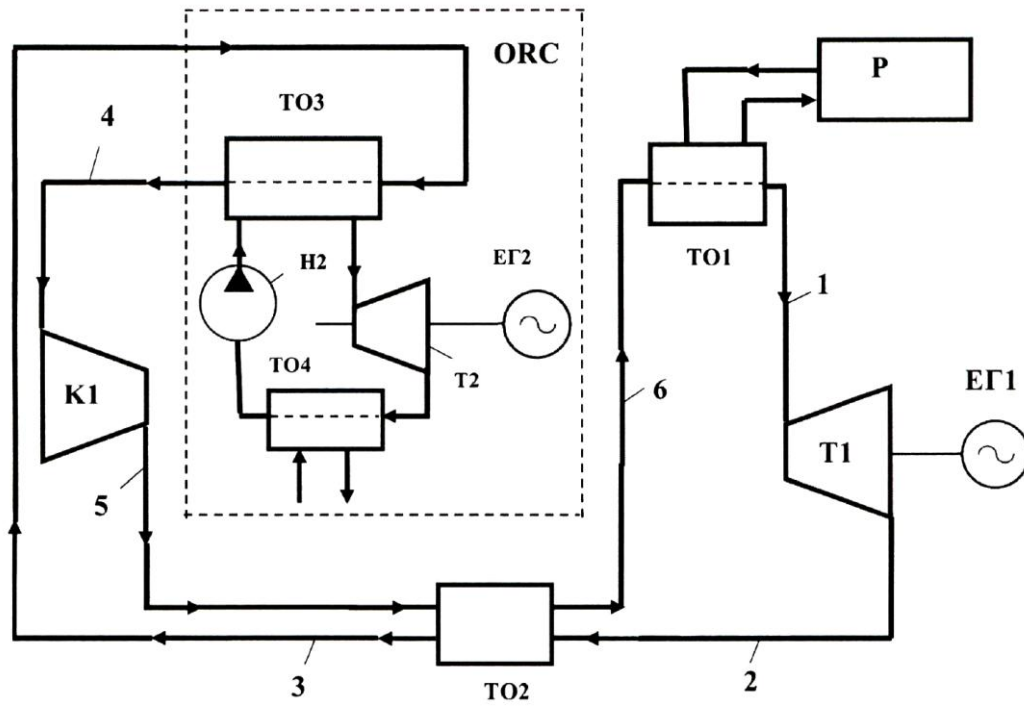
9. Patent CN108643979B. Supercritical carbon dioxide closed cycle turbo compressor.

10. Patent CN113606006A. Supercritical carbon dioxide turbine compression all-in-one machine.

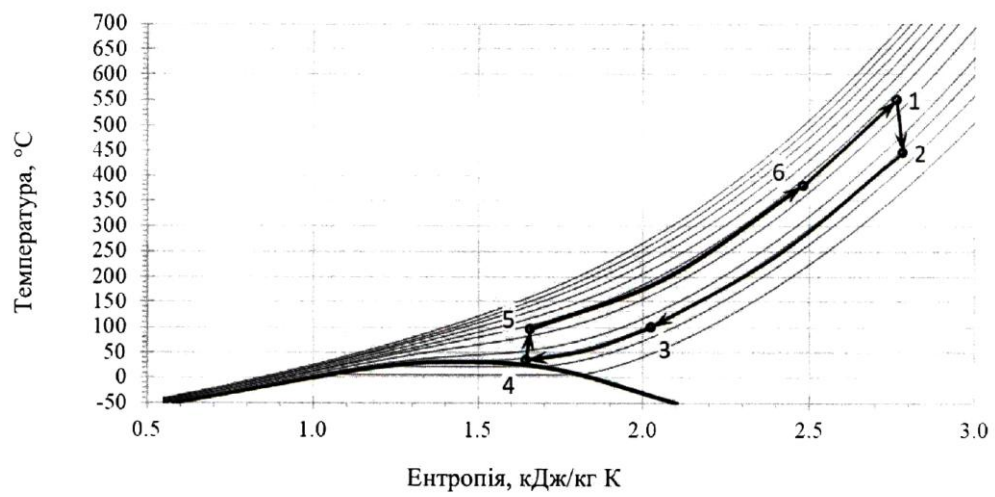
11. Patent CN112267919A. A supercritical carbon dioxide extended cycle power generation system and method.

12. Quoilin S., Van Den Broek M., Declaye S., Dewallef P., Lemorta V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 22. P. 168-186.

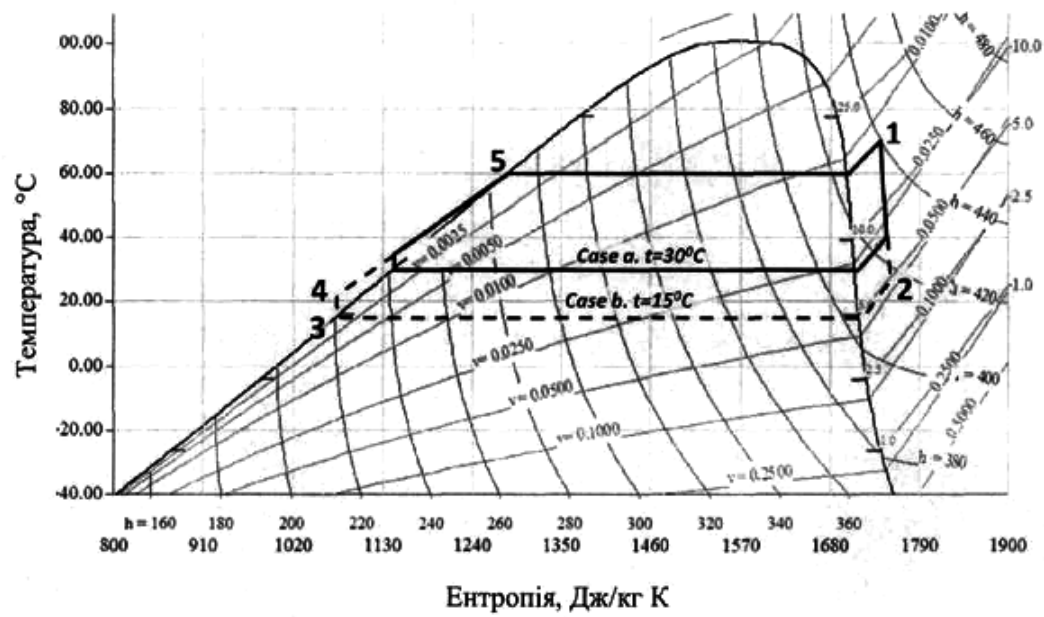
13. Kalinkevych M. V., Storizhko V. Yu., Nefedov O.M. Energy equipment of nuclear power plants with high-temperature small modular reactor // Thermophysics and thermal power engineering. Volume 47, № 2, 2025.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фіг. 3