

## ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЦИКЛІВ КАСКАДНОЇ ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Геотермальна енергія є одною з найбільших перспективних і підготовлених для практичного освоєння. За кордоном при використанні геотермальної енергії головну увагу приділяють одержанню електричної енергії. У 2000 р. в 21 країні були в експлуатації геотермальні електричні станції (ГеоЕС) з сумарною встановленою потужністю 7974 МВт, а в США встановлена потужність ГеоЕС склала 2228 МВт [1-3]. Ефективне перетворення геотермальної енергії в електричну вимагає створення спеціального енергетичного устаткування. У зв'язку з недостатньо високою термодинамічною ефективністю ГеоЕС (ККД близько 10-12%) продовжуються дослідження і ведуться розробки гібридних і комбінованих теплових схем енергетичних станцій, пошук ефективних робочих тіл і оптимізація термодинамічних параметрів циклів.

Найбільш ефективною є схема використання геотермальної енергії разом з теплонасосною установкою [1-7]. Створення систем опалення на базі ТНУ передбачає або повну реконструкцію системи опалення, або проектування нової системи низькотемпературного опалення в режимі 55/30 °С. Застосування ТНУ в діючих системах опалення вимагає розробки теплових схем з високотемпературним теплоносієм для роботи установки в температурному режимі 85/60 °С, як пікові джерела теплоти [2], оскільки допускається використовувати ТНУ для утилізації теплоти скидної геотермальної води.

У роботах [5-7] наведені результати дослідження термодинамічної ефективності циклів одноступеневої ТНУ з різними робочими речовинами. При порівняльній оцінці ефективності термодинамічних циклів з різними робочими речовинами (хладон R134a, R22, R21, R142b) можна побачити, що температура конденсації збільшується до 65 ÷ 70 °С і навіть 95 ÷ 120 °С зі зростанням температури в процесі підведення тепла від низькотемпературного джерела [5], що дозволяє забезпечити режим теплопостачання споживачів з температурним режимом 95/70 °С.

Однак, температура випаровування робочої речовини повинна мати значення близько 50 °С і вище. Як показують результати розрахунків, робоча речовина ефективна в діапазоні з температурою випаровування і температурою конденсації близько 20 ÷ 25 °С. У більшому температурному діапазоні ефективними є цикли з двоступінчастим (багатоступінчастим) стисканням і однією робочою речовиною, або каскадні (багатоступінчасті) цикли з декількома робочими речовинами [8-11].

Фірмою «Rotex» розроблена ТНУ з бінарним циклом, яка характеризується наступними параметрами: тепла потужність становить від 11 до 16 кВт; коефіцієнт перетворення (COP) 2,88 ÷ 3,08;

температура випаровування - до 25 °С, температура конденсації - до 80 °С. В якості робочих речовин двоступеневої ТНУ використовувалися хладони R410a і R134a.

У даній роботі наводяться результати порівняльної оцінки термодинамічної ефективності двоступеневої теплової схеми і каскадної (багатоступеневою) теплової схеми ТНУ. В якості робочих речовин вивчалися хладони R407с, R134a.

Теплова схема двоступеневої ТНУ з однією робочою речовиною (хладон R407с) показана на рис. 1.

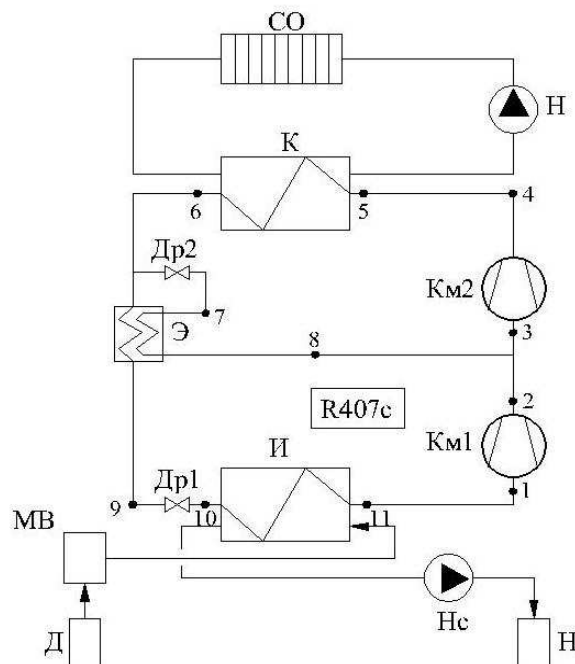


Рис.1. Теплова схема двоступеневої ТНУ з проміжним охолоджувачем: Км1 - компресор ступені низького тиску; Км2 - компресор ступені високого тиску; К - конденсатор; І - випарник; Е - економайзер; Др1, Др2 - дросельні вентилі; МВ - модуль водоочистки; Нс - насос; СО - система опалення; Д -- видобувна свердловина; Н - нагнітаюча свердловина.

Теплова схема каскадної ТНУ наведена на рис. 2. Розрахункові точки циклу показані на схемі рис. 3.

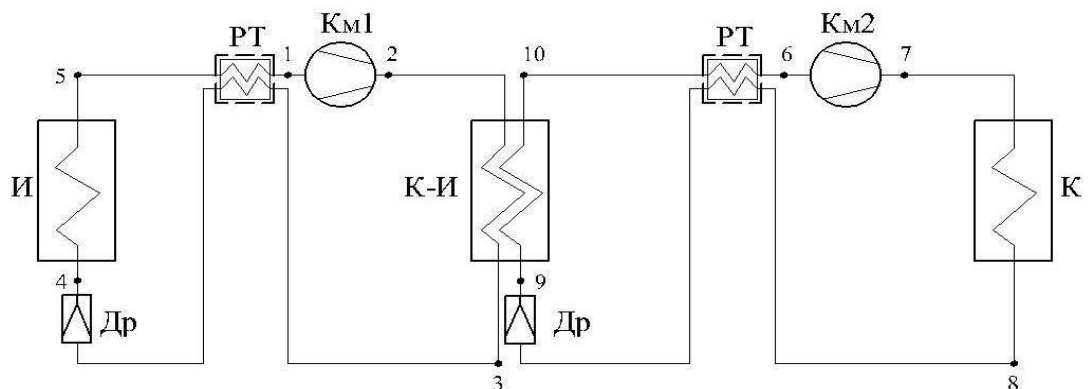


Рис.2. Теплова схема каскадної ТНУ:  
Км1, Км2 - компресор; К - конденсатор; І - випарник; І-К - проміжний випарник-конденсатор.

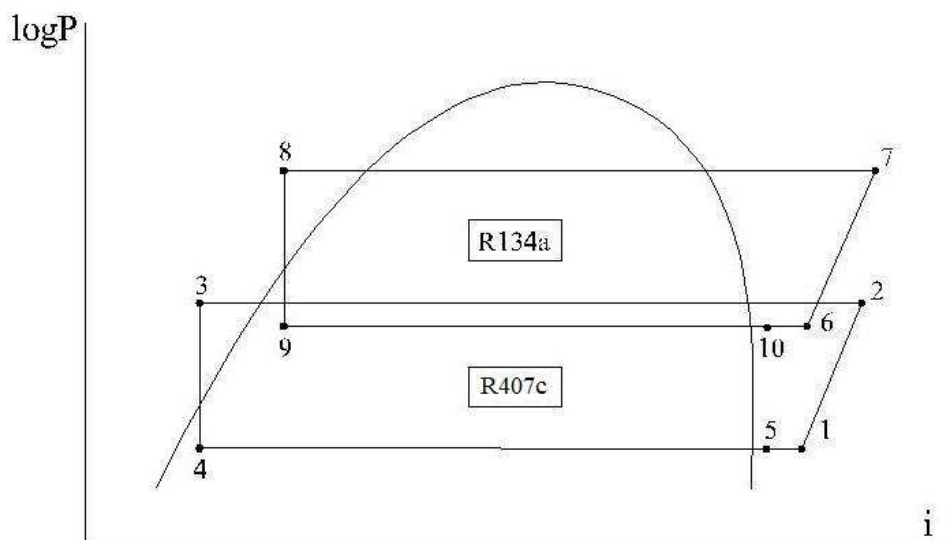


Рис.3. Цикли двоступеневої (каскадної) ТНУ з робочими речовинами – хладони R407c і R134a.

Результати розрахунку термодинамічної ефективності різних теплових схем ТНУ наведені в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Значення термодинамічних параметрів каскадного циклу ТНУ  
( $t_{т.в.} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{с.в.} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

| Параметр  | Точки циклу |      |      |      |      |       |      |      |
|---|-------------|------|------|------|------|-------|------|------|
|   | 1           | 2    | 3    | 4    | 5    | 6     | 7    | 8    |
| Температура<br>робочої<br>речовини,<br>$^{\circ}\text{C}$ | 19,0        | 49,6 | 22,0 | 10,0 | 20,8 | 104,0 | 83,0 | 15,0 |

Таблиця 2

Значення термодинамічних параметрів двоступінчастого циклу  
ТНУ (хладон R407c,  $t_{т.в.} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{с.в.} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

| Точки<br>циклу | P, бар | t, $^{\circ}\text{C}$ | i, кДж/кг | S, кДж/(кг·К) | V, м <sup>3</sup> /кг |
|----------------|--------|-----------------------|-----------|---------------|-----------------------|
| 1              | 11,76  | 37,0                  | 429,57    | 1,7632        | 11,76                 |
| 2S             | 20,46  | 63,74                 | 443,09    | 1,7632        | 11,93                 |
| 2              | 20,46  | 69,47                 | 450,31    | 1,7894        | 12,46                 |
| 3              | 20,46  | 65,37                 | 445,17    | 1,7743        | 12,08                 |
| 4S             | 35,60  | 95,60                 | 458,76    | 1,7743        | 6,60                  |
| 4              | 35,60  | 100,60                | 466,00    | 1,7939        | 7,12                  |
| 5              | 35,60  | 100,60                | 496,00    | 1,7939        | 7,12                  |
| 6              | 36,60  | 71,89                 | 319,00    | 1,3761        | 1,17                  |
| 7              | 11,76  | 27,00                 | 319,00    | 1,4031        | 9,38,                 |
| 8              | 11,76  | 37,00                 | 429,57    | 1,7632        | 20,60                 |

Примітка: 2S, 4S – ізоентропійні процеси.

Результати розрахунку термодинамічних параметрів циклу і характеристики каскадної ТНУ наступні:

- холодоагент нижнього каскаду R407c; холодоагент верхнього каскаду

R134a;

- температура випаровування в нижньому каскаді  $T_{ELT} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура випаровування в верхньому каскаді  $T_{EHT} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  (максимально допустима);
- температура конденсації в нижньому каскаді  $T_{CLT} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура конденсації в верхньому каскаді  $T_{CHT} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- холодопродуктивність в нижньому каскаді  $Q_{ELT} = 16 \text{ кВт}$ ;
- холодопродуктивність в верхньому каскаді  $Q_{EHT} = 30,8 \text{ кВт}$ ;
- теплопродуктивність в нижньому каскаді  $Q_{CLT} = 16,8 \text{ кВт}$ ;
- теплопродуктивність установки  $Q_{CHT} = 58,0 \text{ кВт}$ ;
- потужність компресора нижнього каскаду  $W_{LT} = 1,777 \text{ кВт}$ ;
- потужність компресора верхнього каскаду  $W_{HT} = 23,51 \text{ кВт}$ ;
- холодильний коефіцієнт нижнього каскаду  $COP_{LT} = 8,562$ ;
- холодильний коефіцієнт верхнього каскаду  $COP_{HT} = 1,564$ ;
- коефіцієнт перетворення нижнього каскаду  $\mu = 9,454$ ;
- коефіцієнт перетворення верхнього каскаду  $\mu = 2,467$ ;
- середній коефіцієнт перетворення  $\mu_{cp} = 5,96$ .

Результати розрахунку характеристик двоступеневої ТНУ з однією робочою речовиною (хладон R407c) наступні:

- температура випаровування –  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура конденсації –  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- холодопродуктивність –  $15 \text{ кВт}$ ;
- теплопродуктивність –  $20 \text{ кВт}$ ;
- потужність компресора Км1 –  $2,84 \text{ кВт}$ ;
- потужність компресора Км2 –  $2,85 \text{ кВт}$ ;
- індикаторний ККД компресорів –  $0,652$ ;
- масова витрата теплоносія –  $0,137 \text{ кг/с}$ ;
- об'ємна витрата теплоносія –  $10,19 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- проміжний тиск –  $20,46 \text{ бар}$ ;
- проміжна температура –  $65,37 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- коефіцієнт перетворення –  $3,64$ .

**Висновки.** Порівняльний аналіз термодинамічної ефективності теплових схем ТНУ показують переваги каскадної. Так, коефіцієнт перетворення каскадної ТНУ становить 5,96 в температурному інтервалі  $30 \div 95 \text{ }^\circ\text{C}$ , що показує можливість використання високотемпературної каскадної ТНУ в традиційних системах опалення будівель в температурному режимі  $85/60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Список літератури:

1. Денисова А.Е. Інтегровані системи альтернативного теплопостачання для енергозберігаючих технологій: автореф. дис. на здобуття наук.

- ступеня д-ра. техн. наук : спец. 05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика» / А.Е. Денисова. – Одеса, 2003. – 36 с.
2. Геотермальное теплохладоснабжение жилых и общественных зданий и сооружений. Нормы проектирования: ВСН 56-87. – [Действующий от 1988-07-01]. – М.: Стройиздат, 1989. – 70 с.
  3. Янтовский Е.И. Парокомпрессионные теплонасосные установки / Е.И. Янтовский, Ю.В. Пустовалов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 144 с.
  4. Соколов Е.Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / Е.Я. Соколов, В.М. Бродянский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.
  5. Огуречников Л.А. Геотермальные ресурсы в энергетике / Л.А. Огуречников // Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – №11. – С. 58-66.
  6. Мартыновский В.С. Термодинамические характеристики циклов тепловых и холодильных машин / В.С. Мартыновский. – М.: Госэнергоиздат, 1952. – 162 с.
  7. Розенфельд Л.М. Термодинамическая теория динамического отопления с помощью холодильной машины / Л.М. Розенфельд // Журнал технической физики. – 1952. – Вып. 8., т. 22. – С.18-27.
  8. Редько А.А. Ступенчатая система теплоснабжения с теплонасосной установкой / А.А. Редько, В.А. Краснопольский, И.А. Редько, Д.Х. Харлампиди // Коммунальное хозяйство городов. – 2008. – Вып. 84. – С. 155-158.
  9. Редько А.А. Анализ режимов работы геотермальных теплонасосных установок / А.А. Редько, Д.Х. Харлампиди // Нова тема. – 2008. – №4. – С. 21-25.
  10. Редько А.А.. Исследование термодинамических режимов геотермальных теплонасосных установок / А.А. Редько, Д.Х. Харлампиди // Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури. – 2009. – Вип. 2 (76). – С.86-98.
  11. Редько А.О. Методика розрахунку геотермальних теплонасосних установок / А.О. Редько, Д.Х. Харлампіді // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2008. – Вип. 12. – С. 80-91.