

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Теплотехнічні процеси та установки

**Визначення ефективності роботи парокомпресійних холо-
дильних установок**

Методичні вказівки
до виконання комп'ютерного практикуму з дисципліни

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Теплотехнічні процеси та установки

**Визначення ефективності роботи парокompресійних
холодильних установок**

Методичні вказівки
до виконання комп'ютерного
практикуму з дисципліни
для студентів спеціальності
«Енергетичний менеджмент»

Затверджено Методичною радою НТУУ «КПІ»

Київ
НТУУ «КПІ»
2010

Теплотехнічні процеси та установки. Визначення ефективності роботи пароконпресійної холодильної установки [Текст]: метод. вказівки до виконання комп'ютерного практикуму з дисципліни для студ. спец. «Енергетичний менеджмент» / Уклад.: Т.О.Ринкова, В.І.Дешко., В.І.Шкляр, О.В.Хількевич. – К.: РЕУУ «КПШ», 2010. – 33 с.

*Гриф надано Методичною радою НТУУ «КПШ»
(Протокол № від)*

Укладачі:

*Ринкова Тетяна Олексіївна, канд. техн. наук, доц.
Дешко Валерій Іванович, д-р техн. наук, проф.
Шкляр Віктор Іванович, канд. техн. наук, доц. Хількевич Олена Валентинівна, магістр.*

Відповідальний редактор:

В.В. Дубровська

Рецензенти:

*М.Ф. Боженко, канд. техн. наук, доц.
В.П. Студенець, канд. техн. наук, доц.*

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Мета та основні завдання роботи.....	5
2. Загальні відомості.....	6
2.1 Термодинамічні основи роботи холодильних установок.....	6
2.2 Парокомпресійні холодильні установки.....	11
2.3 Властивості холодильних агентів.....	13
3. Опис пакету комп'ютерних програм «CoolPack».....	18
3.1 Побудова T-s та lg p – h діаграм для певного холодильного агента.....	20
3.2 Визначення параметрів холодоагента в характерних точках циклу за допомогою комп'ютерної програми «CoolPack».....	24
4. Розрахунок ПКХУ.....	27
5. Вимоги до звіту.....	30
6. Контрольні питання.....	30
7. Список рекомендованої літератури.....	32
Додаток	33

ВСТУП

Процес охолодження – це процес отримання штучного холоду. Охолодження до мінусових температур здавна використовувалося для збереження харчових продуктів та медичних препаратів. Пізніше необхідність охолодження виникла при скрапленні газів, при будівництві мостів і тунелів, у металургійній, електронній, ракетній і багатьох інших галузях промисловості.

При зростанні попиту на низькі температури розвивалась техніка охолодження. Від простих льодовиків з їх обмеженою ємністю, сезонністю роботи і незначним рівнем охолодження, ця техніка прийшла до холодильних машин безперервної дії, які дозволяють виробляти дуже велику кількість холоду (40÷60 ГДж/год.) і досягати температур, близьких до абсолютного нуля (0,00002 К), при помірно малих витратах енергії [1].

За рівнем температури охолодження холодильні установки поділяються на:

- 1) холодильні установки помірного охолодження (діапазон температур від кімнатних до -100°C);
- 2) холодильні установки глибокого охолодження (до температур нижче -100°C).

В свою чергу, агрегати для отримання температур нижче -100°C , умовно класифікується наступним чином:

- a) установки глибокого охолодження (від 173 до 55 К);
- b) криогенні установки (від 40 до 0,3 К);
- c) установки наднизьких температур (до 0,00002 К) [2].

Парокомпресійні холодильні установки (ПКХУ) відносяться до холодильних установок помірного охолодження. Термодинамічні основи роботи зазначених установок та конструкції основного обладнання докладно викладені в технічній літературі [1, 2, 3, 4, 5, 6].

На сучасному етапі з'явилися нові можливості вивчення роботи та визначення енергоефективності ПКХУ за допомогою обчислювальної техніки. Персональний комп'ютер може виконувати великий об'єм обчислювальних операцій за короткий період часу, що дозволяє дослідити роботу холодильної уста-

новки в різних режимах і одночасно забезпечує необхідну точність. Такий метод доцільний ще й тому, що дозволяє дуже точно, за допомогою комп'ютерних програм, визначати властивості холодильних агентів за термодинамічними діаграмами та будувати самі діаграми і цикли ПКХУ на них. Для цього використовуються стандартні комп'ютерні пакети програми «CoolPack» [7], які не тільки розширюють уявлення про процеси охолодження, але й сприяють розвитку у студентів навичок використання обчислювальної техніки.

1 МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ РОБОТИ

Мета роботи – закріпити та розширити знання отримані при вивченні курсу «Теплотехнічні процеси та установки» (розділ «Охолодження»); ознайомитись з пакетом комп'ютерних програм «CoolPack»; для певного холодильного агента провести варіантні комп'ютерні розрахунки показників енергоефективності ПКХУ; визначити умови роботи холодильника, коли витрати енергії мінімальні.

Основні завдання роботи:

- 1) За допомогою пакета комп'ютерних програм «CoolPack» для певного холодильного агента побудувати і роздрукувати $T-s$ та $lgp-h$ діаграми.
- 2) На діаграмах побудувати цикли ПКХУ, які працюють за сухим ходом компресора, при наявності: дросельного вентиля; детандера і переохолодження рідкого холодильного агента після конденсатора.
- 3) За допомогою $T-s$ діаграми в комп'ютерній програмі «CoolPack» визначити основні параметри холодильного агента в вузлових точках циклу.
- 4) Зробити розрахунок питомих характеристик циклів, холодильного коефіцієнта, ексергетичного коефіцієнта корисної дії холодильної установки, витрати холодильного агента та потужності приводу компресора.
- 5) На основі проведених розрахунків обрати яка ПКХУ, з дросельним вентиляем, детандером або переохолодженням, є найефективнішою з точки зору енергозбереження. Зробити висновки.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

2.1 Термодинамічні основи роботи холодильних установок.

Другий закон термодинаміки є теоретичною основою, на якій базується робота теплових двигунів, холодильних установок і теплових насосів, так званих термодинамічних машин, в яких один вид енергії перетворюється у другий.

Одне з формулювань другого закону термодинаміки говорить, що теплота від тіл менш нагрітих (з температурою T_2) не може передаватись більш нагрітим тілам ($T_1 > T_2$) без компенсації. Тим самим підкреслюється певна направленість або необоротність природних процесів передачі теплоти [8].

Щодо циклічних процесів, які лежать в основі роботи холодильних установок, компенсуючим процесом слід вважати витрату енергії зовні. Холодильні установки працюють за зворотними циклами, в яких робота стиснення робочого тіла (холодильного агента), більша роботи його розширення. Для функціонування зворотних циклів, крім холодильного агента, який відтворює цикл, необхідно мати, як мінімум, два джерела теплоти з різними температурами – нижнє (холодне) джерело з температурою T_X і верхнє (гаряче) джерело з температурою T_G , причому, $T_X < T_G$. Особливістю холодильних установок є те, що температура верхнього джерела знаходиться на рівні температури навколишнього середовища $T_{НС}$.

Можна розглядати оборотні цикли холодильних установок, наприклад цикл Карно, та необоротні реальні цикли.

До необоротності циклів призводить наявність різниці температур між об'єктом охолодження (холодним джерелом) і холодильним агентом, який отримує теплоту від цього об'єкта, а також між холодильним агентом та гарячим джерелом. Очевидно, що:

$$T_X \geq T_2, \quad (1)$$

де T_2 – температура холодильного агента при отриманні теплоти від холодного джерела.

Знак « \Leftarrow » відноситься до оборотного процесу підводу теплоти холодильному агенту, а знак « \Rightarrow » - до необоротного процесу.

Треба зазначити, що зовнішня корисна робота в циклі витрачається так, щоб температура холодильного агента стала б рівною або більшою за температуру гарячого джерела і тому:

$$T_r \leq T_1, \quad (2)$$

де T_1 – температура холодильного агента при передачі теплоти гарячому джерелу.

Така необоротність циклів називається зовнішньою необоротністю [6, 9].

Має місце необоротність циклу холодильної установки не тільки в процесах підводу та відводу теплоти, але й в процесах розширення і стиснення холодильного агента через наявність тертя. Така необоротність називається внутрішньою.

На рис. 1 показано термодинамічну схему холодильної установки, що працює за зворотним циклом Карно.

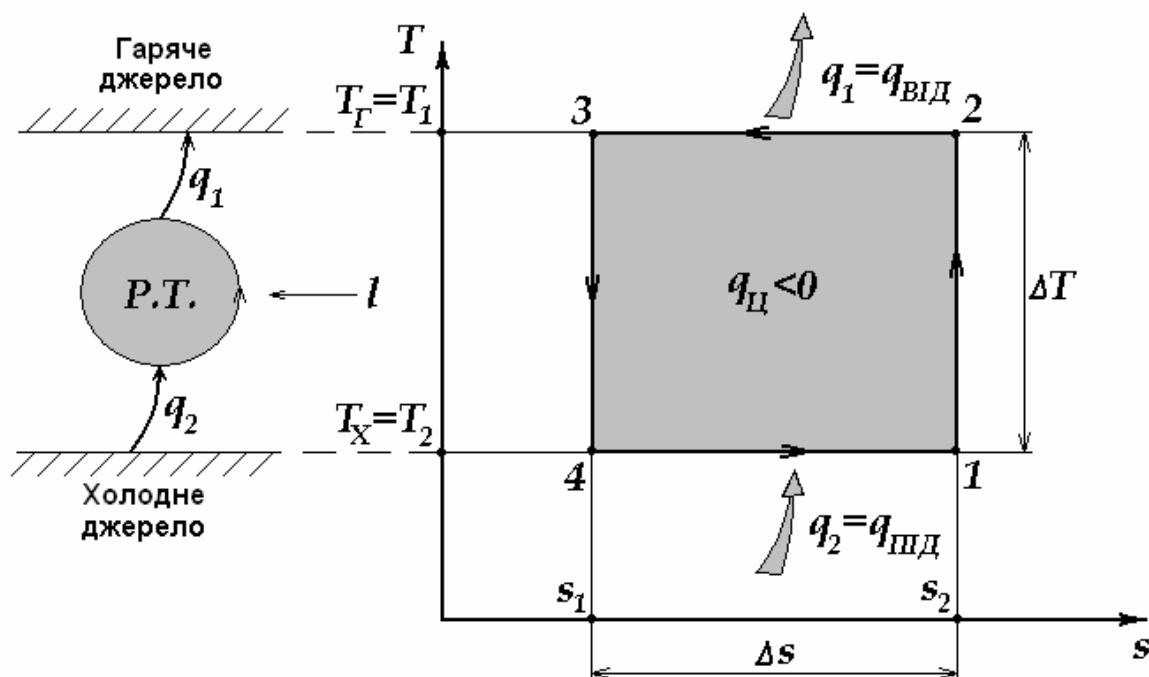


Рис. 1 Термодинамічна схема та зворотний цикл Карно у T - s діаграмі.

Внаслідок витрати роботи l , теплота від нижнього менш нагрітого середовища, в кількості q_2 передається верхньому більш нагрітому середовищу, в кількості q_1 . Перший закон термодинаміки для кругових процесів можна записати так [8, 10]:

$$q_{ц} = l_{ц} = l. \quad (3)$$

Крім того, теплота циклу складається з теплот процесів, що його утворюють, а саме: теплоти підводу q_2 в процесі (1 – 2) і теплоти відводу q_1 в процесі (3 – 4). Основна властивість T – s діаграми полягає в тому, що площа діаграми, обмежена кривою процесу, крайніми ординатами і віссю ентропій, еквівалентна питомій теплоті, тобто:

$$\begin{aligned} \text{Пл } 41s_2s_14 &= q_2, \\ \text{Пл } 23s_1s_22 &= q_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Як видно з рис. 1, q_2 – це теплота, що підводиться до робочого тіла (холодоагента), яке відтворює зворотний цикл, а q_1 – це теплота, яка від нього відводиться в циклі. Тоді:

$$q_{\text{ц}} = q_{\text{під}} - q_{\text{від}} = (q_2 - q_1) < 0. \quad (5)$$

Порівнюючи вирази (3) і (5), будемо мати:

$$l = q_{\text{ц}} = (q_2 - q_1) < 0. \quad (6)$$

Від’ємне значення роботи циклу говорить про те, що без затрати зовнішньої роботи, охолодження об’єктів до температури нижчої за температуру навколишнього середовища та вироблення холоду, є неможливим.

Приймаючи в енергетичних балансах термодинамічних машин теплоту і роботу як додатні величини, значення зовнішньої роботи знайдеться за формулою:

$$l = q_1 - q_2. \quad (7)$$

Ефективність холодильного циклу оцінюється відношенням виробленого холоду (холодопродуктивності) до витраченої роботи, яке називається холодильним коефіцієнтом:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{1}{\frac{q_1}{q_2} - 1}. \quad (8)$$

Холодильний коефіцієнт показує, яку кількість холоду можна відняти від об’єкта охолодження, витративши при цьому одиницю зовнішньої роботи. За своїм змістом величина ε може бути як більшою, так і меншою за 1.

Формули (3 – 8) були отримані без урахування будь-яких особливостей зворотного циклу Карно і тому їх можна використовувати для будь-яких холодильних установок.

До особливостей циклу Карно слід віднести наступне:

1) Ефективність циклу Карно не залежить від властивостей робочого тіла і визначається значеннями температур холодного і гарячого джерел. Цей висновок легко довести. Згідно рис. 1:

$$q_1 = T_r \cdot \Delta s, \quad q_2 = T_x \cdot \Delta s,$$

тоді:

$$\varepsilon_K = \frac{T_x \cdot \Delta s}{T_r \cdot \Delta s - T_x \cdot \Delta s} = \frac{T_x}{T_r - T_x}. \quad (9)$$

2) У даному інтервалі температур (між максимальною температурою підводу і мінімальною температурою відводу теплоти) цикл Карно є найбільш ефективним:

$$\varepsilon \leq \varepsilon_K. \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l} \leq \frac{T_x}{T_r - T_x}. \quad (11)$$

В технічній літературі [5, 11] поряд з холодильним коефіцієнтом пропонується ввести коефіцієнт корисної дії холодильної установки, який оцінює наближення довільного холодильного циклу до зворотного оборотного циклу Карно в тому ж інтервалі температур:

$$\eta_{х.у.} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_K}. \quad (12)$$

Підтвердимо викладені вище положення аналізуючи роботу повітряної холодильної компресійної установки (ПХУ). Порівнювальний аналіз проведемо за допомогою T - s діаграми (рис. 2).

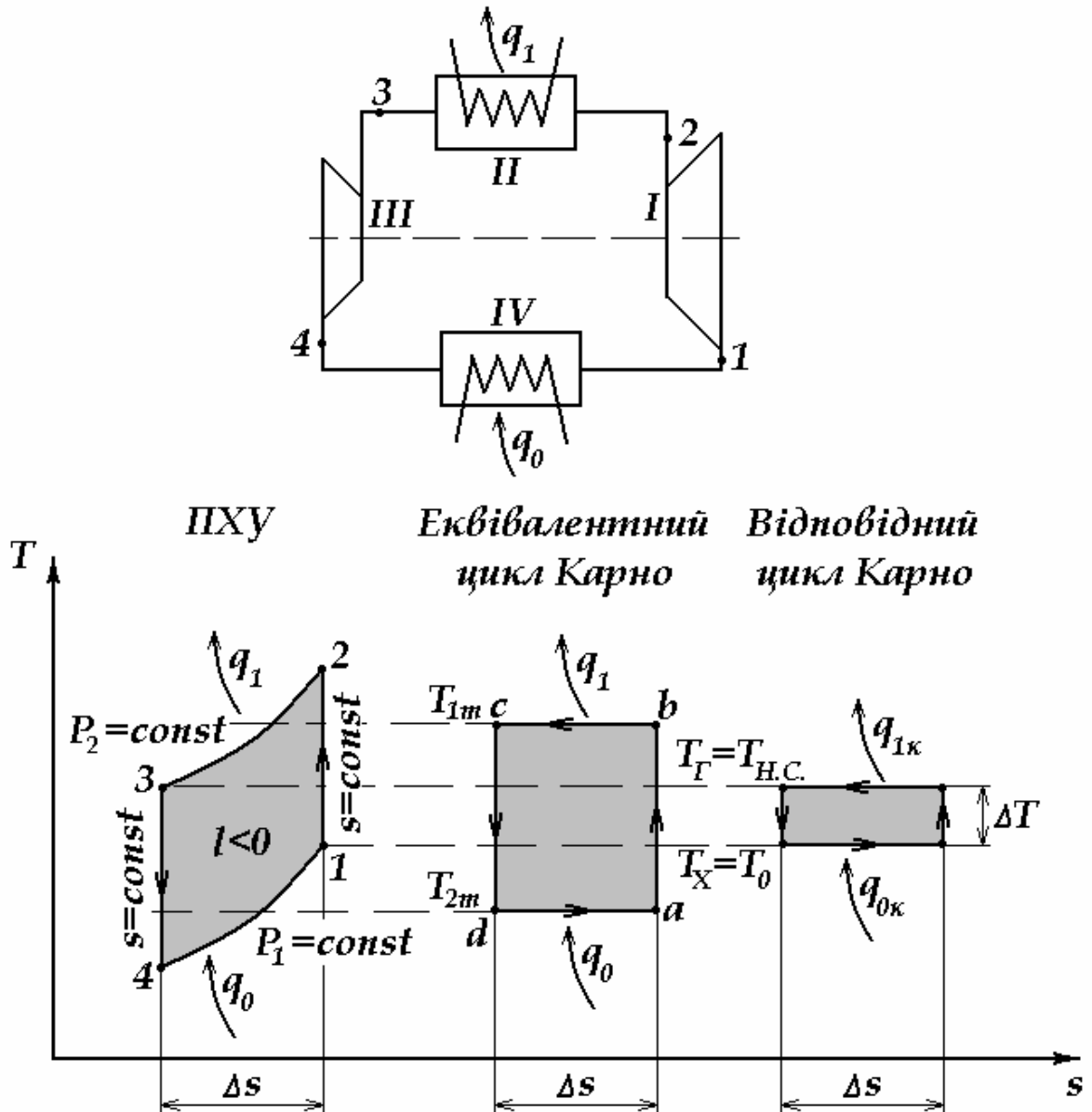


Рис. 2 Схема та порівнювальний аналіз роботи зворотних циклів ПХУ, еквівалентного і відповідного циклів Карно.

Цикл ПХУ складається з чотирьох процесів:

- (1 - 2) - адіабатне стиснення повітря ($s=const$) у компресорі (I) до температури, яка вище за температуру навколишнього середовища;
- (2 - 3) - ізобарний процес відводу теплоти від стисненого повітря до навколишнього середовища ($p_2=const$) у водяному холодильнику (II);
- (3 - 4) - адіабатне розширення повітря ($s=const$) у детандері (III);
- (4 - 1) - ізобарний процес підводу теплоти до холодного повітря від об'єкту охолодження ($p_1=const$) у холодильній камері (IV).

В холодильній техніці при термодинамічному аналізі використовується метод циклів і вводиться поняття еквівалентного циклу Карно, а також, питома холодопродуктивність позначається q_0 .

Еквівалентний цикл Карно, який замінює довільний цикл (в нашому випадку цикл ПХУ), протікає при середньотермодинамічних температурах підводу і відводу теплоти і має ефективність, що дорівнює ефективності довільного циклу. З рис. 2 очевидно, що:

$$T_{1m} = \frac{q_1}{\Delta s}, \quad (13)$$

$$T_{2m} = \frac{q_0}{\Delta s}, \quad (14)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_K^{EK} = \frac{T_{2m}}{T_{1m} - T_{2m}}, \quad (15)$$

де T_{1m} , T_{2m} – середньотермодинамічна температура відводу та підводу теплоти у зворотному еквівалентному циклі Карно відповідно;

ε_K^{EK} - холодильний коефіцієнт еквівалентного циклу Карно;

Δs – зміна ентропії в процесах підводу і відводу теплоти.

На рис. 2 для порівняння поряд з еквівалентним циклом Карно зображено відповідний цикл Карно, який у заданому інтервалі температур ΔT є найбільш ефективним і завжди відбувається при максимальній температурі підводу і мінімальній температурі відводу в циклі [9]. Такими температурами є:

T_0 – температура об'єкта охолодження (найбільша температура підводу T_1);

T_{HC} – температура навколишнього середовища (найнижча температура відводу теплоти T_3).

При заданих сталих температурах T_0 і T_{HC} холодильний коефіцієнт досягає найбільшого значення:

$$\varepsilon_K = \frac{T_0}{T_{HC} - T_0}, \quad (16)$$

яке відповідає оборотному циклу Карно для холодильної установки, в якій коефіцієнт корисної дії дорівнює одиниці ($\eta_{ХУ} = 1$). Звідси можна зробити висно-

вок, що при сталих температурах T_0 і T_{HC} для довільної холодильної установки коефіцієнт корисної дії холодильної установки є мірою термодинамічної досконалості та втрат ексергії, наприклад при наявності зовнішньої необоротності в процесах підводу і відводу теплоти. Тому цей коефіцієнт ще називається ексергетичним коефіцієнтом корисної дії:

$$\eta_E = \eta_{XV} \leq 1. \quad (17)$$

Відхилення значення η_E від 1 служить мірою втрат ексергії, яких можна, в принципі, уникнути і які можуть бути зменшені шляхом досконалого, з точки зору енергозбереження, проведення циклу та покращення конструкції апаратів установки.

Зв'язок між ε , ε_K , та η_E визначиться з наступних співвідношень; на основі рівнянь (11), (14) і (15), отримаємо:

$$\eta_E = \frac{\frac{\varepsilon}{T_0}}{T_{HC} - T_0} = \varepsilon \cdot \frac{T_{HC} - T_0}{T_0}, \quad (18)$$

або

$$\eta_E = \varepsilon \cdot |-\tau_E|, \quad (19)$$

де ε - холодильний коефіцієнт реальної установки;

$$\tau_E = \frac{T_0 - T_{HC}}{T_0} \text{ - фактор Карно, ексергетична температурна функція [12].}$$

Для процесів вироблення холоду, коли $T_0 < T_{HC}$, фактор Карно змінюється в широкому інтервалі значень від $-\infty$ до 0 [11]. В холодильній практиці для того, щоб не оперувати від'ємними значеннями, фактор Карно в формулі (19) беруть по модулю. Математично не складно довести, що:

$$|-\tau_E| = -\frac{(T_0 - T_{HC})}{T_0} = \frac{T_{HC} - T_0}{T_0}.$$

У відповідному циклі Карно процеси відводу і підводу теплоти протікають ізотермічно. Карнотизація циклів холодильних установок потребує застосування реальних процесів, що протікають при $T = const$. Такими процесами є

процеси фазового переходу – кипіння та конденсація. А холодильною установкою, що використовує ці процеси, є парокompресійна холодильна установка.

2.2. Парокompресійні холодильні установки.

У парокompресійних холодильних установках (ПКХУ) в якості холодильного агента використовують вологу насичену пару будь-якої рідини з температурою кипіння, яка не перевищує 0°C при атмосферному тиску.

На рис. 3 зображена принципова схема ПКХУ з дросельним вентиляем, яка працює по сухому ходу компресора та її цикл у $T-s$ та $lgp-h$ діаграмах.

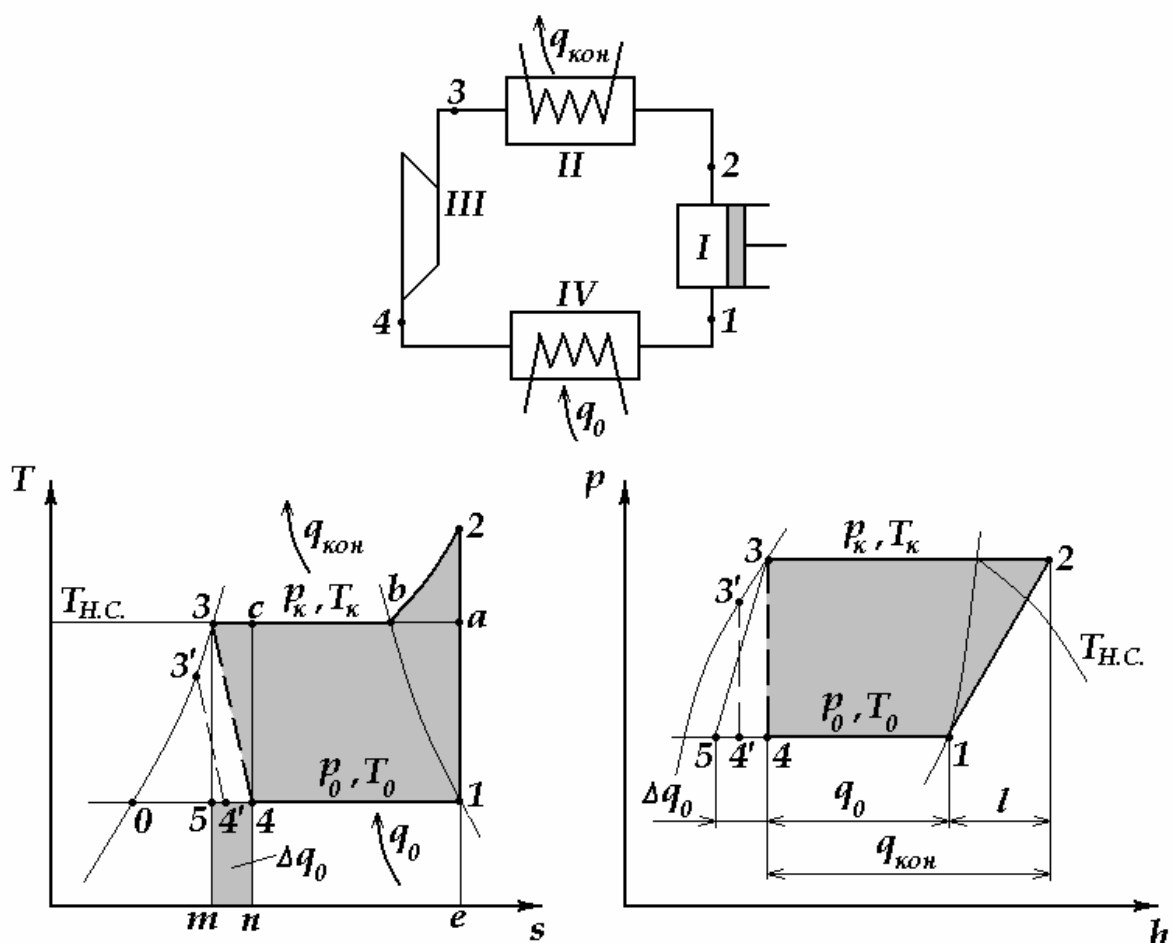


Рис. 3 Схема і теоретичний цикл одноступеневої холодильної машини з дросельним вентиляем.

Згідно схеми і циклу ПКХУ робочі процеси холодильної установки є наступними:

(1 – 2) – адіабатне стиснення робочого тіла у компресорі (I);

(2 – 3) – ізобарне охолодження і конденсація пари холодильного агента за рахунок відводу теплоти в навколишнє середовище у конденсаторі (II), причому, тиск і температура у процесі конденсації позначені p_K і T_K ;

(3 – 4) – розширення робочого тіла у дросельному вентилі (III);

(4 – 1) – кипіння робочого тіла у випарнику (IV) за рахунок підводу теплоти від джерела з низькою температурою, причому, оскільки розглядається зразковий цикл, то температура кипіння холодильного агента і температура об'єкта охолодження співпадають і рідина кипить при тискові p_0 і температурі T_0 ;

(3 – 3') – процес переохолодження рідкого холодоагента у конденсаторі (II);

(3' – 4') – розширення робочого тіла у дросельному вентилі (III) після переохолодження;

(4' – 1) – кипіння робочого тіла у випарнику (IV) в циклі з переохолодженням рідкого холодоагента;

(3 – 5) – адіабатне розширення холодоагента у детандері.

Процес дроселювання позначено пунктирною лінією, тому що він є необоротним. Цей процес відбувається при $h = const$ [11]. Порівняно з повітряною холодильною установкою адіабатне розширення в детандері (циліндрі розширювання) замінено дроселюванням у дросельному вентилі, що забезпечує простоту і зручність регулювання роботи холодильної установки. Крім того, через великі габаритні розміри у детандері мають місце великі теплопритоки, що погіршує ефективність роботи холодильної установки, і яких в ПКХУ вдається уникнути.

ПКХУ, яка працює по сухому ходу компресора, забезпечує безпечну роботу компресора без гідравлічних ударів. Попадання краплин рідкого холодоагента у компресор може призвести до аварії.

На рис. 3 чітко видно, що процес дроселювання призводить до зменшення холодопродуктивності. Для того, щоб це не відбувалось, вводять переохолодження рідкого холодильного агента або в самому конденсаторі, або в додатковому теплообміннику для переохолодження (на рисунку не показано).

2.3. Властивості холодильних агентів.

У парокомпресійних холодильних установках застосовують холодильні агенти, які повинні мати певні термодинамічні, фізико-хімічні та фізіологічні властивості. Практика експлуатації ПКХУ встановлює такі технологічні вимоги до холодильних агентів:

1) Критична температура повинна бути істотно вищою від температури оточуючого середовища (вода, повітря) для забезпечення відведення теплоти від холодоагента при його конденсації.

2) Теплота випаровування при низьких температурах має бути якнайбільшою для зменшення кількості холодоагента, який циркулює в тракті холодильної машини. За цієї умови розміри машини будуть зменшуватися при заданій холодопродуктивності.

3) Густина пари холодоагента має бути якнайбільшою для зниження робочих об'ємів машин.

4) Тиск пари за умов конденсації повинен бути помірним. Це дозволить забезпечити умови міцності елементів холодильної установки та зменшити витрати металу на їх виготовлення.

5) Тиск пари у випарнику повинен бути трохи вищим від атмосферного. Ця умова виключає всмоктування атмосферного повітря в робочий тракт і спрощує виявлення нещільностей і місць витікання пари холодоагента.

6) Холодоагент має бути хімічно інертним стосовно конструкційних і мастильних матеріалів машини.

7) Холодоагент має бути пожежо- і вибухобезпечним в експлуатації та нешкідливим для обслуговуючого персоналу.

8) Холодоагент повинен бути економічно доступним [1, 3, 6].

У табл. 1 наведено основні фізичні властивості найбільш уживаних холодоагентів.

До теплофізичних властивостей, поданих у табл. 1, необхідно додати інформацію про особливості робочих тіл холодильних машин, тобто їх класифікувати.

Холодоагенти можна розділити на *природні* (аміак NH_3 , вуглекислота CO_2 , хлорметил CH_3Cl та ін.) і *штучні*, об'єднані спільною назвою *фреони*.

Фреони – галоїдні похідні насичених вуглеводнів (C_mH_n), отримані шляхом заміни атомів водню атомами хлору і фтору.

Хімічна формула фреону, отриманого на базі вуглеводню C_mH_n : $\text{C}_m\text{H}_x\text{F}_y\text{Cl}_z$, причому

$$x+y+z=n.$$

Зі зменшенням x зменшується займистість фреону. Зі збільшенням y знижуються токсичність та корозійна активність.

Позначення фреонів Ф-N, де N – номер фреону (двозначне чи тризначне число). Перша цифра в двозначному номері чи перші дві цифри в тризначному номері вказують насиченій вуглеводень (C_mH_n) на базі якого отриманий фреон.

Встановлені наступні значення цих цифр: 1 – CH_4 (метан); 11 – C_2H_6 (етан); 21 – C_3H_8 (пропан); 31 – C_4H_{10} (бутан).

Справа пишеться число атомів фтору (y) у фреону: CF_2Cl_2 – Ф-12; CCl_4 – Ф-10; $\text{C}_3\text{F}_4\text{Cl}_4$ – Ф-214, C_3Cl_3 – Ф-210.

При наявності у фреоні атомів водню число їх (x) додається до числа десятків номера: CFCl_3 – Ф-11; CHFCl_2 – Ф-21; $\text{C}_3\text{F}_4\text{Cl}_4$ – Ф-214; $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$ – Ф-234.

Робочі тіла холодильних машин можна розділити на три групи за значеннями температури кипіння $t_{\text{кип. ну}}$ при нормальних умовах ($p = 0,1013$ МПа).

Група 1: $t_{\text{кип. ну}} > 0^\circ\text{C}$ (тиск конденсації $p_{\text{к}} \leq 0,3$ МПа при температурі конденсації 30°C).

Група 2: $0 > t_{\text{кип. ну}} > -50^\circ\text{C}$ (тиск конденсації $0,3 < p_{\text{к}} < 2,0$ МПа).

Група 3: $t_{\text{кип. ну}} < -50^\circ\text{C}$ (тиск конденсації $p_{\text{к}} = 2,0 \div 7$ МПа).

Холодильний агент	Хімічна формула	Молекулярна маса, г	Температура кипіння (при $p=760$ мм рт. ст.), °С	Параметри критичної точки			Температура замерзання t_3 , °С	Показник адіабати $k = \frac{c_p}{c_v}$
				Температура $t_{кр}$, °С	Тиск $p_{кр}$, Мн/м ²	Питомий об'єм $v_{кр}$, дм ³ /кг		
Аміак	NH ₃	17,03	-33,4	132,4	11,298	4,13	-77,7	1,3
Вуглекислота	CO ₂	44,01	-78,5	31,0	7,375	2,16	-56,6	1,3
Сірчистий ангідрид	SO ₂	64,06	-10,08	157,2	7,873	1,92	-75,2	1,26
Хлорметил	CH ₃ Cl	50,49	23,74	143,1	6,677	2,70	-97,6	1,20
Монофтортрихлорметан (фреон – 11)	CFCl ₃	137,39	23,7	198,0	4,374	1,805	-111,0	1,13
Дифтордихлорметан (фреон – 12)	CF ₂ Cl ₂	120,92	-29,8	112,0	4,115	1,793	-155,0	1,14
Трифтормонохлорметан (фреон – 13)	CF ₃ Cl	104,47	-81,5	28,78	3,86	1,721	-180,0	-
Монофтордихлорметан (фреон – 21)	CHFCl ₂	102,92	8,90	178,5	5,166	1,915	-135,0	1,16
Дифтормонохлорметан (фреон – 22)	CHF ₂ Cl	86,48	-40,8	96,0	4,936	1,905	-160,0	1,20
Тетрафтордихлоретан (фреон – 114)	C ₂ F ₄ Cl ₂	170,91	3,5	145,8	3,275	1,715	-94,0	1,107
Дифтормонохлоретан (фреон – 142)	C ₂ H ₃ F ₂ Cl	100,48	-9,25	137,0	4,119	2,30	-130,8	1,135

Чим вище температура $t_{\text{кип. ну}}$, тим нижчим буде тиск у конденсаторі й тим глибшим розрідження у випарнику (табл. 2).

Чим нижча температура $t_{\text{кип. ну}}$, тим вищий тиск у конденсаторі та випарнику, тим ближче температура конденсації до критичної температури. При цьому зменшується рушійна сила теплопереносу від холодоагента в оточуюче середовище, ускладнюється конструкція машини, зростають необоротні теплові втрати, підвищується витрата зовнішньої енергії і падає холодильний коефіцієнт ε [1].

Саме з цих причин перестала використовуватися як холодоагент вуглекислота CO_2 , незважаючи на найбільшу об'ємну холодопродуктивність q_v (табл. 3) і, як наслідок, найменший об'єм циліндра компресора.

Важливим параметром для оцінки перспективності холодоагентів є робочі тиски у випарнику та конденсаторі холодильної машини. Від цих тисків залежать зусилля на робочому органі компресора, параметри міцнісні вузлів машини і її трубопроводів, коефіцієнт корисної дії компресора. Ці тиски також знаходяться у прямому зв'язку з температурою кипіння (див. табл. 2).

Найкращими за цими параметрами є аміак, фреон – 22, фреон – 12 і хлористий метил.

Таблиця 2. Тиск в апаратах холодильних машин, працюючих на різних агентах (при температурі кипіння $t_0 = -15^\circ\text{C}$ та температурі конденсації $t = 30^\circ\text{C}$) [1].

Холодильний агент	Абсолютний тиск у випарнику p_0 , МПа	Абсолютний тиск у конденсаторі p_K , МПа	Різниця тисків $p_K - p_0$, МПа	Ступінь стиснення $\frac{p_K}{p_0}$
CO_2	2,289	7,192	4,903	3,14
NH_3	0,236	1,167	0,931	4,94
Фреон – 22	0,297	1,202	0,905	4,05
Фреон - 12	0,183	0,743	0,560	4,07
CH_3Cl	0,144	0,659	0,515	4,57
SO_2	0,0807	0,457	0,376	5,66
Фреон – 142	0,0796	0,394	0,314	4,94
Фреон - 114	0,0466	0,255	0,208	5,47
Фреон – 21	0,0362	0,216	0,180	5,95
Фреон - 11	0,0201	0,126	0,106	6,27

Наступним важливим параметром є об'ємна холодопродуктивність q_v , від якої залежить розмір циліндра компресора. Найбільше значення q_v має двоокис вуглецю, а за ним ідуть ті ж самі аміак, фреон – 22, фреон – 12 і хлористий ме-

тил (див. табл. 3). Ці холодоагенти доцільно використовувати в холодильних установках з поршневыми компресорами при малих габаритах машини.

Холодоагенти з малими значеннями q_b (фреони 11 і 21) доцільно використовувати в установках високої холодопродуктивності із застосуванням у них турбокомпресорних машин з їх швидкохідністю і великою об'ємною продуктивністю.

Визначальними експлуатаційними характеристиками є хімічна активність, токсичність, пожежо- і вибухонебезпечність робочих тіл, а також їх відносна вартість.

Необхідно відзначити високу токсичність сірчаного ангідриду, аміаку і хлористого метилу. Навіть незначний вміст пари цих речовин у повітрі ((0,5÷1)% об'ємний) призводить до важких отруєнь і швидкої загибелі. На відміну від інших речовин, різкий запах аміаку може служити сигналом, що попереджає про небезпеку. Через високу шкідливість і руйнівну дію на деталі машин, особливо в присутності вологи, сірчистий ангідрид у сучасних холодильних машинах не застосовується. З міркувань шкідливості, а також вибухонебезпечності виключений з експлуатації і хлористий метил.

Таблиця 3. Питома холодопродуктивність різних холодильних агентів і порівняльні розміри циліндрів компресорів (при $t_0 = -15^\circ\text{C}$ і $t = 30^\circ\text{C}$ без переохолодження рідини) [1].

Холодильний агент	Теплота утворення, кДж/кг	Ступінь сухості після дрослювання x , %	Холодопродуктивність q_0 , кДж/кг	Питомий об'єм сухої насиченої пари v_1 , м ³ /кг	Об'ємна холодопродуктивність q_b , кДж/кг	Порівняльні розміри компресорів ($V_{hCO_2} = 1$)
CO ₂	273,2	52,8	129,0	0,0166	7763,8	1,0
NH ₃	1312,7	16,0	1078,5	0,5087	2167,1	3,58
Фреон – 22	217,7	26,0	161,1	0,0778	2068,3	3,75
Фреон - 12	161,5	26,6	118,6	0,0927	1279,5	6,07
CH ₃ Cl	420,7	16,9	349,7	0,291	1202,9	6,45
SO ₂	391,9	15,5	331,3	0,405	816,8	9,50
Фреон – 142	229,5	25,2	171,1	0,2585	661,8	11,8
Фреон - 114	141,8	30,1	99,4	0,2627	377,7	20,6
Фреон – 21	254,7	18,4	190,9	0,5705	364,3	21,3
Фреон - 11	191,1	19,2	158,1	0,771	204,7	38,0

3 ОПИС ПАКЕТУ КОМП'ЮТЕРНИХ ПРОГРАМ «COOLPACK»

Пакет комп'ютерних програм «CoolPack» - це зібрання програм моделювання, які використовуються для проектування, аналізу та оптимізації систем охолодження [7].

Всі програми в пакеті «CoolPack» розділені на 6 груп, кожен з яких можна побачити на панелі інструментів (рис. 4):

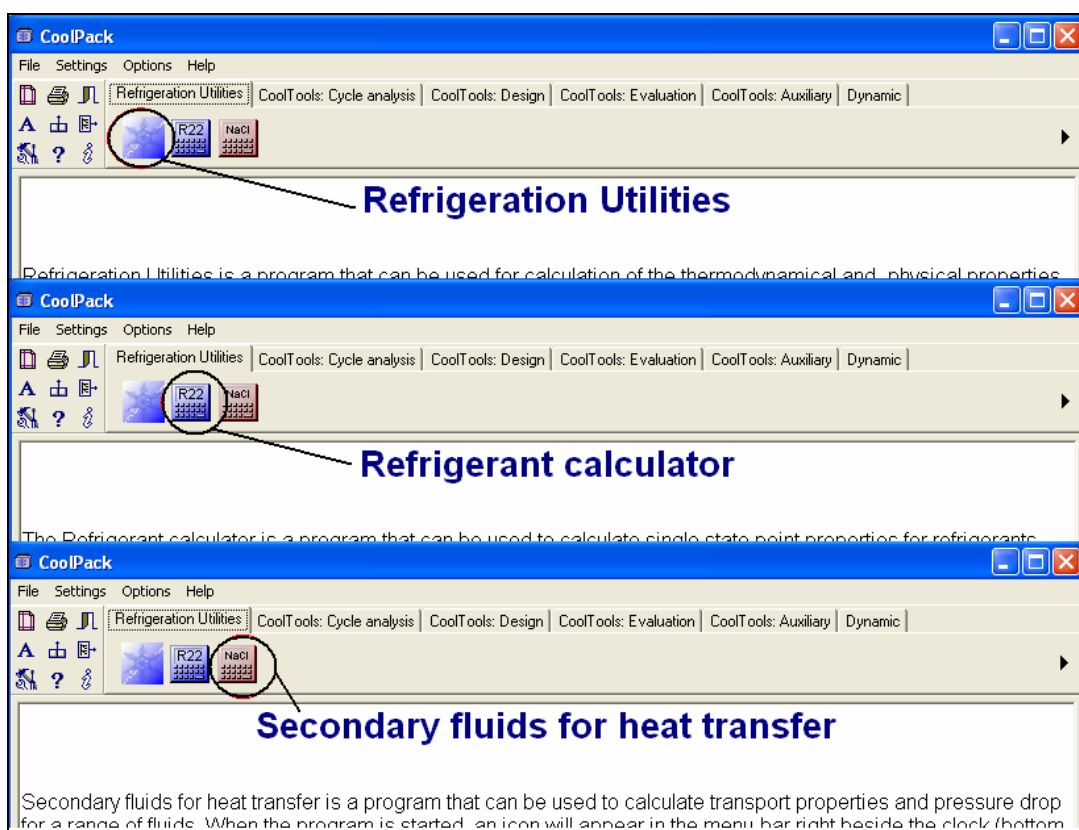


Рис. 4 Три вкладки робочого вікна пакету програм «CoolPack».

1. Refrigeration Utilities – властивості холодильних агентів.
2. Cool Tools: Cycle analysis – аналіз циклів систем охолодження.
3. Cool Tools: Design – проектування систем охолодження.
4. Cool Tools: Evaluation – енергетичний аналіз системи охолодження, та розрахунок шляхів збереження енергії.
5. Cool Tools: Auxiliary – допоміжні засоби для аналізу та розрахунку систем охолодження.
6. Dynamic – динаміка зміни температури холодоагента.

Для виконання лабораторної роботи будемо використовувати першу групу програм пакету «CoolPack», а саме - Refrigeration Utilities.

Refrigeration Utilities – група програм, яка може використовуватись для аналізу і обчислення термодинамічних і фізичних властивостей різних холодильних агентів. Також вона дає можливість виконувати прості обчислення для стандартних циклів охолодження.

Група програм Refrigeration Utilities має наступні особливості:

- можливість побудови $lgp-h$, $T-s$ та $h-s$ діаграм для ряду холодильних агентів;
- обчислення стандартного циклу охолодження;
- таблиці насиченості холодильних агентів;
- таблиці термодинамічних і фізичних властивостей холодильних агентів;
- можливість побудови $h-x$ діаграми (ентальпія – ступінь вологості) для вологого повітря при тиску в межах від 0,014 до 50 бар.

Група програм Refrigeration Utilities включає в себе три програми (рис. 4), а саме: безпосередньо Refrigeration Utilities, Refrigerant calculator та Secondary fluids for heat transfer, які використовуються для визначення окремих точкових характеристик холодоагентів.

В лабораторній роботі будемо використовувати програму Refrigeration Utilities.

Щоб активувати пакет програм «CoolPack» необхідно знайти файл на «Робочому столі» **CoolPack.exe** та запустити його. Далі у вікні програми (рис. 4) обираємо необхідну нам програму - Refrigeration Utilities. Робоче вікно програми має вигляд представлений на рис. 5.

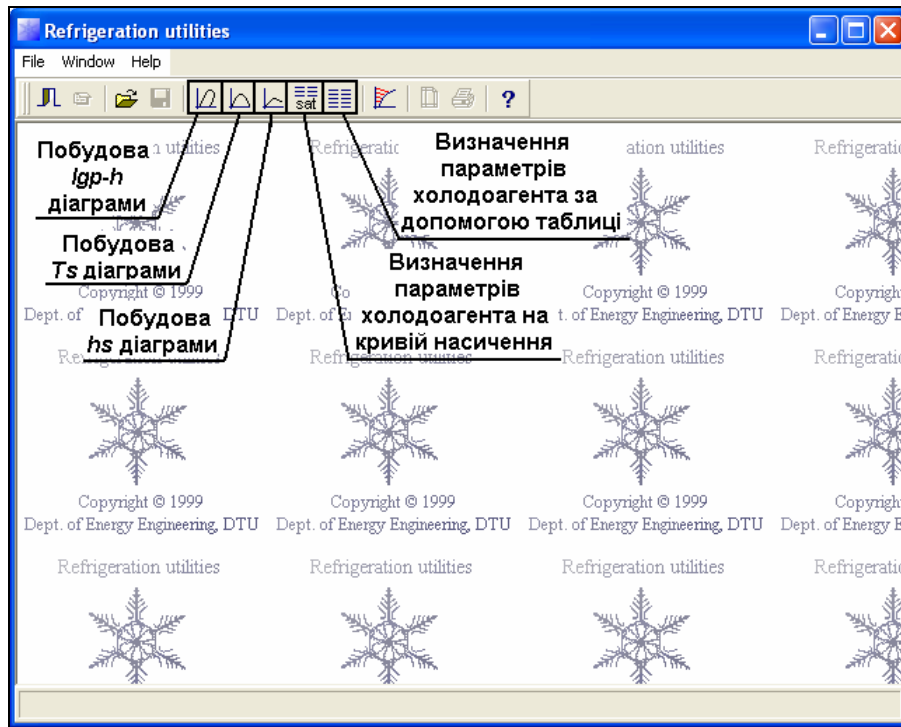



Рис. 5 Вид робочого вікна програми Refrigeration Utilities.

3.1 Побудова $T-s$ та $lgp-h$ діаграм для певного холодильного агента

Побудова $T-s$ діаграми.

Щоб побудувати $T-s$ діаграму для певного холодоагента, знаходимо на панелі інструментів кнопку, що відповідає даній команді -  (рис. 5), і натискаємо на неї. Після натиснення на екрані з'явиться вікно (рис.6) в якому необхідно задати параметри для побудови $T-s$ діаграми.

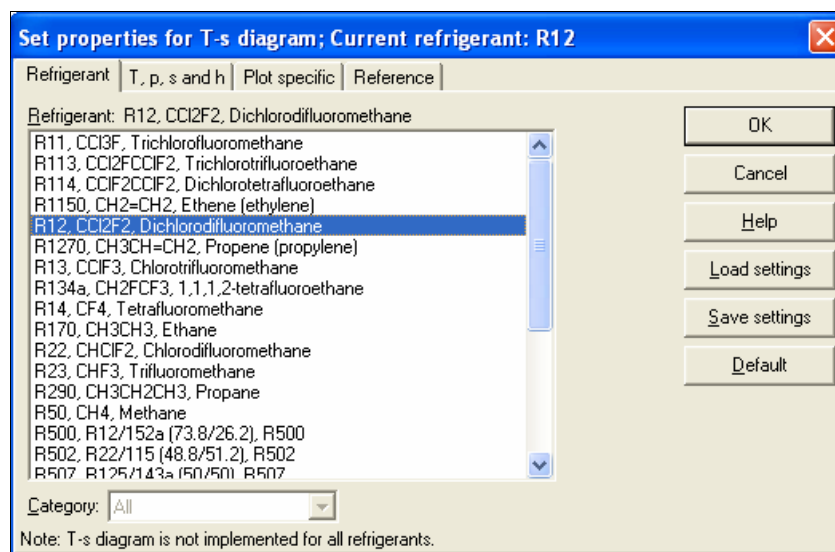


Рис. 6 Допоміжне вікно для побудови $T-s$ діаграми: вкладка для вибору холодоагента.

Спочатку необхідно обрати потрібний нам холодильний агент з представленого списку (рис. 6). Нехай це буде, наприклад, фреон – 12 (R12).

Далі необхідно задати параметри для побудови діаграми (рис. 7)


Data for R12:	
T _{Max} = 1000,00 °C	T _{critical} = 112,00 °C
T _{Min} = -90,00 °C	P _{critical} = 4157,6 kPa
P _{Max} = 7500 kPa	V _{critical} = 0,001792
P _{Min} = 2,84233 kPa	

Рис. 7 Допоміжне вікно для побудови $T-s$ діаграми: вкладка для введення параметрів побудови.

Також програма дає можливість налаштувати густоту побудови ізохор та ізобар на діаграмі (вкладка Plot specific, див. рис. 6 або 7).

Задавши всі необхідні параметри, тиснемо на «ОК» і програма буде $T-s$ діаграму для заданого холодоагенту (рис. 8).

Побудова $lgp-h$ діаграми.

Щоб побудувати $lgp-h$ діаграму для певного холодоагента, натискаємо на кнопку  на панелі інструментів (рис. 5). Далі, аналогічно як і для $T-s$ діаграми, задаємо необхідні параметри для побудови, і отримуємо в результаті потрібну нам $lgp-h$ діаграму (рис. 9).

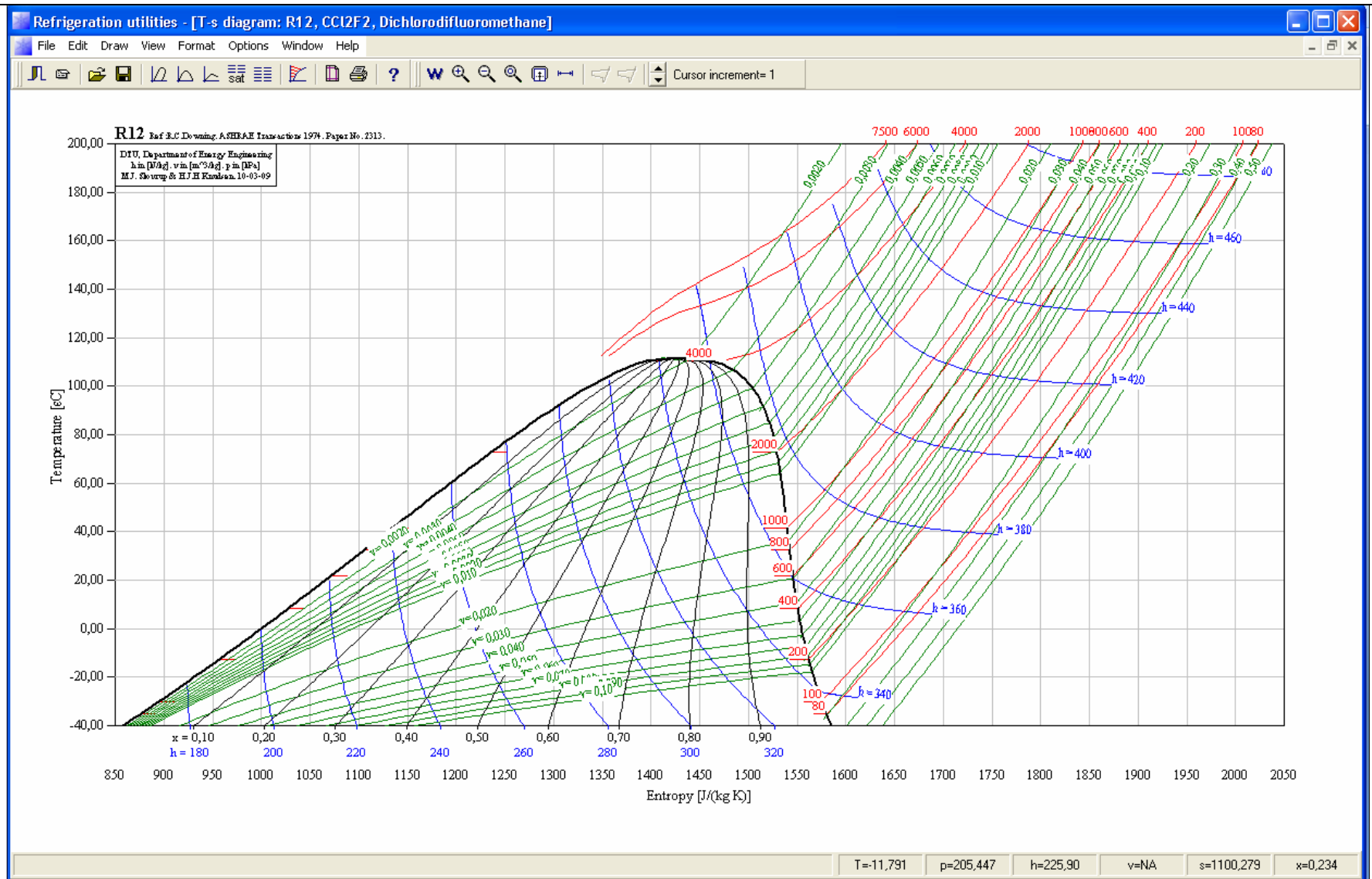


Рис. 8 T-s діаграма побудована за допомогою пакету програм «CoolPack»

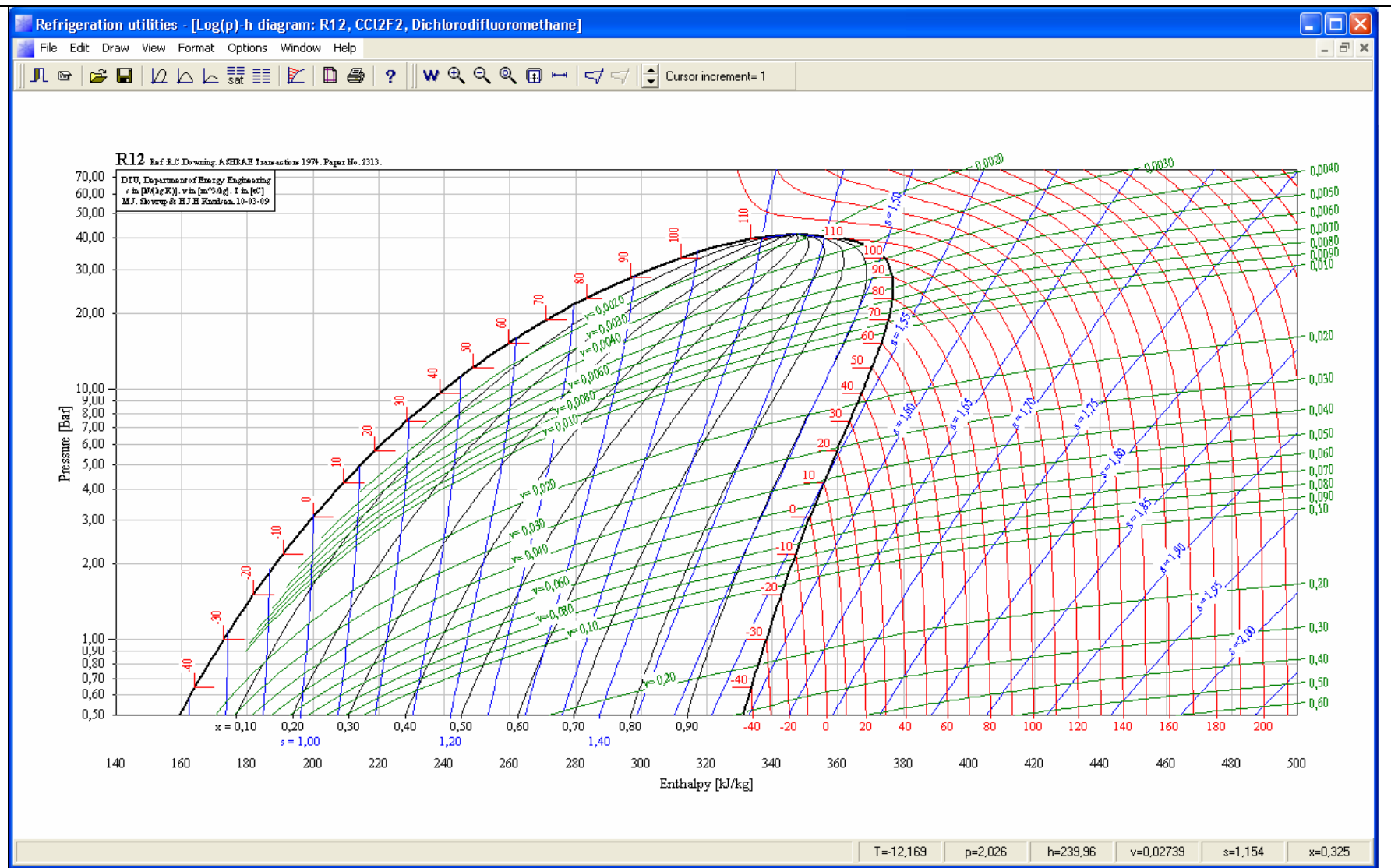


Рис. 9 $\lg p$ - h діаграма для фреону-12 побудована за допомогою пакету програм «CoolPack»

3.2 Визначення параметрів холодоагенту в характерних точках циклу за допомогою комп'ютерної програми «CoolPack».

Для визначення параметрів холодильного агента програма надає декілька можливостей:

1) **За допомогою діаграм.** При цьому, встановлюючи курсор в характерну точку на площині діаграми, в правому нижньому куті робочого вікна відображаються параметри холодильного агента, які відповідають цій точці (рис. 10): температура, тиск, ентальпія, питомий об'єм, ентропія, ступінь вологості.

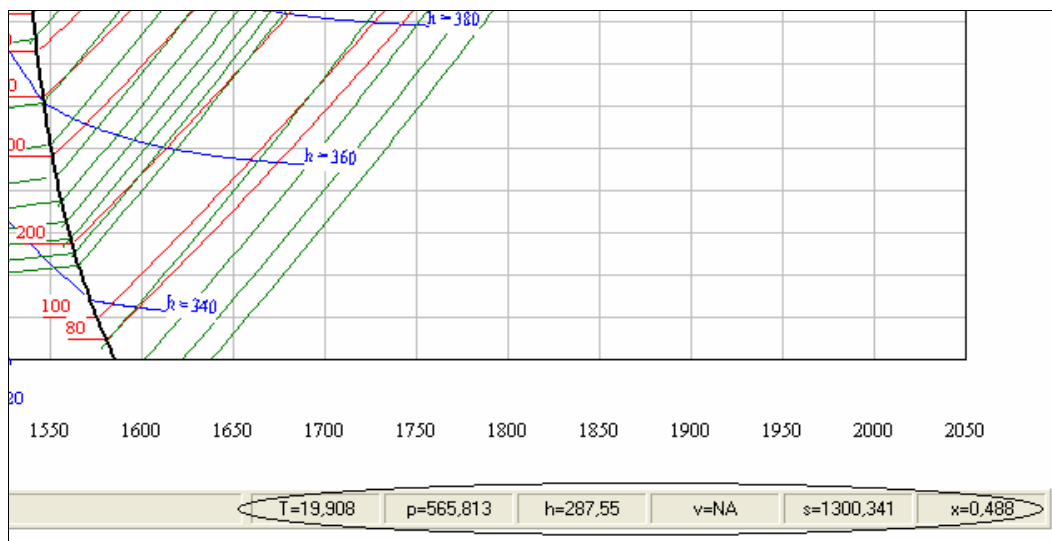


Рис. 10 Відображення параметрів, які відповідають точці положення курсору.

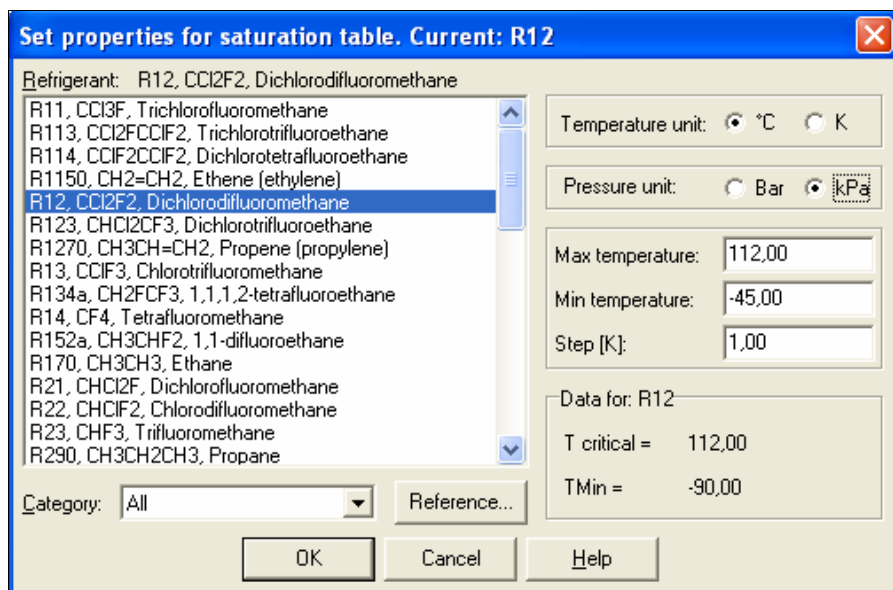

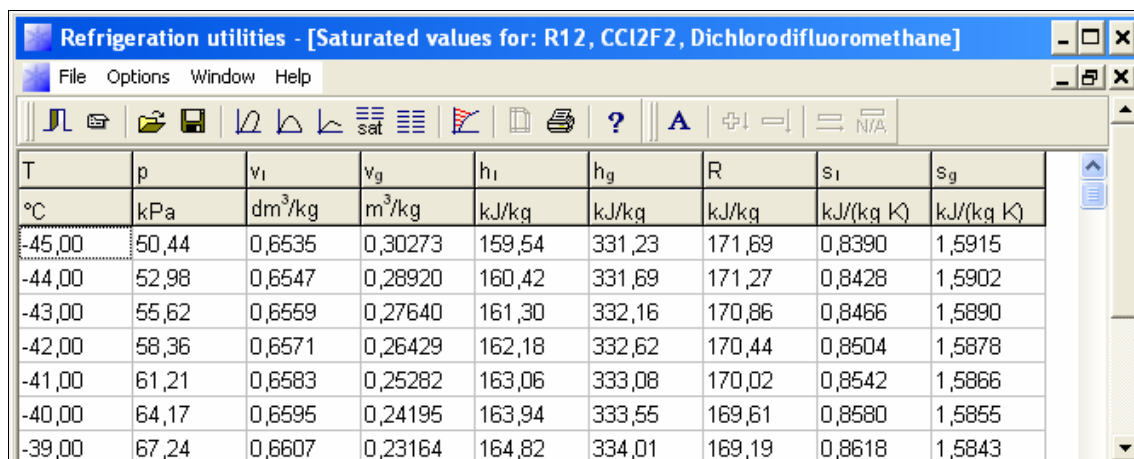



Рис. 11 Допоміжне вікно для побудови таблиці значень параметрів певного холодильного агента на кривій насичення.

2) За допомогою таблиць. Натиснувши на кнопку  (див. рис.5), що розташована на панелі інструментів, на екрані з'явиться робоче вікно в якому необхідно обрати холодоагент, та задати необхідні параметри (якщо вони відрізняються від тих, що подані). Після чого на екран буде виведено таблицю значень параметрів холодильного агента на кривій насичення (рис. 11 та 12).



T	p	v _l	v _g	h _l	h _g	R	s _l	s _g
°C	kPa	dm ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
-45,00	50,44	0,6535	0,30273	159,54	331,23	171,69	0,8390	1,5915
-44,00	52,98	0,6547	0,28920	160,42	331,69	171,27	0,8428	1,5902
-43,00	55,62	0,6559	0,27640	161,30	332,16	170,86	0,8466	1,5890
-42,00	58,36	0,6571	0,26429	162,18	332,62	170,44	0,8504	1,5878
-41,00	61,21	0,6583	0,25282	163,06	333,08	170,02	0,8542	1,5866
-40,00	64,17	0,6595	0,24195	163,94	333,55	169,61	0,8580	1,5855
-39,00	67,24	0,6607	0,23164	164,82	334,01	169,19	0,8618	1,5843

Рис. 12 Таблиця значень параметрів певного холодильного агента на кривій насичення.

3) Також можна побудувати таблицю параметрів холодильного агента в будь-якій потрібній точці (а не лише на кривій насичення), натиснувши на кнопку  (див. рис. 5). У допоміжному вікні, що з'явиться після натискання, необхідно вказати холодоагент, а також два незалежні параметри та їх граничні значення (рис. 13).

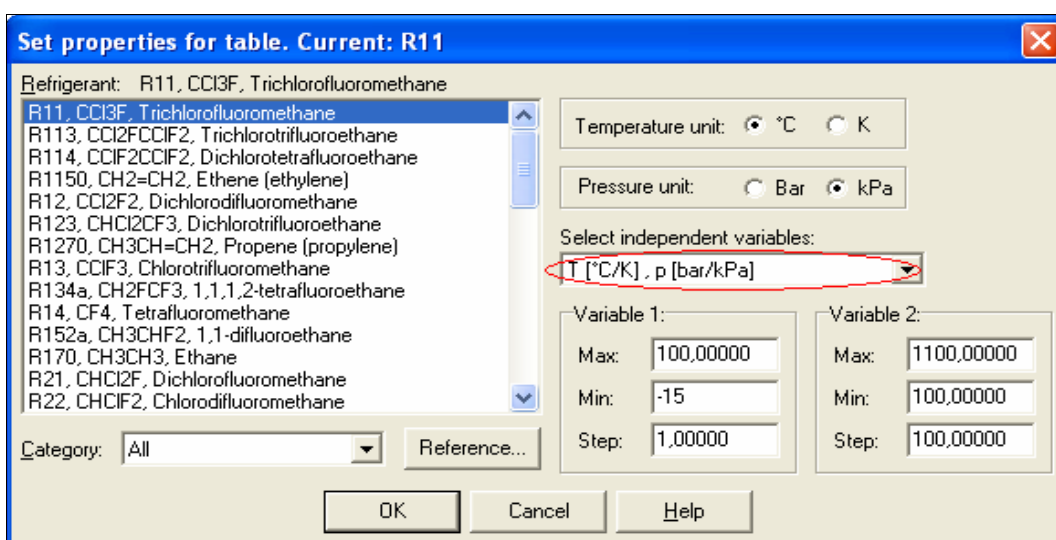


Рис. 13 Допоміжне вікно для побудови таблиці для визначення залежного параметру при відомих двох незалежних параметрах.

Наприклад, необхідно при певній температурі і тиску знайти третій параметр, то тоді температура і тиск – незалежні параметри. Далі на екран буде виведено таблицю в якій потрібно вказати третій, залежний параметр, значення якого необхідно знайти (рис. 14).

T	p	H gas
°C	kPa	kJ/kg
-15,000	100,000	378,5099111
-15,000	200,000	374,4528805
-15,000	300,000	369,4244253
-15,000	400,000	361,8418379
-15,000	500,000	N/A
-15,000	600,000	N/A
-15,000	700,000	N/A
-15,000	800,000	N/A
-15,000	900,000	N/A
-15,000	1000,000	N/A
-15,000	1100,000	N/A
-14,000	100,000	379,0773257
-14,000	200,000	375,071662

Рис. 14 Таблиця для визначення залежного параметру при відомих двох незалежних параметрах.

4 РОЗРАХУНОК ПКХУ

Завдання для розрахунку. Парокомпресійна холодильна установка працює при температурі випаровування t_0 . Пара з випарника виходить сухою насиченою. Температура конденсації дорівнює t_K . Загальна холодопродуктивність холодильної установки складає Q_0 . Вихідні дані наведені у додатку 1.

При розрахунку зразкового циклу ПКХУ необхідно визначити:

- 1) потужність приводу компресора N , кВт;
- 2) витрату холодильного агента m , кг/с;
- 3) теплове навантаження конденсатора $Q_{кон}$, кВт;
- 4) холодильний коефіцієнт ε ;
- 5) ексергетичний коефіцієнт ПКХУ.

Всі розрахунки необхідно провести також для випадку наявності детандера замість дросельного вентиля та коли введено переохолодження холодоагента у конденсаторі на 10°C.

Порядок розрахунку:

1. За допомогою програми «CoolPack» будуються та роздруковуються $T-s$ та $lgp-h$ діаграми для заданого варіанту (Дод. 1).
2. В $T-s$ та $lgp-h$ діаграмах будується цикл ПКХУ.
3. За допомогою програми «CoolPack» визначаються параметри холодоагента (p, T, h, s, v) в характерних точках циклу та заносяться до табл.5.

Таблиця 5. Параметри холодильного агента в вузлових точках циклу.

Точка	Параметри				
	$T, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/кг}\cdot\text{К}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$
1					
2					
...					

4. Далі за даними табл.5 визначаються наступні величини у такій послідовності:

1) Питома теплота підводу в циклі або питома холодопродуктивність.

Оскільки процес у випарнику ізобарний, то:

$$q_{\text{під}} = q_0 = \Delta h = h_1 - h_4, \text{кДж/кг} \quad (20)$$

2) Питома теплота відводу в циклі або питома навантаження у конденсаторі. Процес (2 – 3) також є ізобарним, тоді:

$$q_{\text{від}} = q_{\text{кон}} = h_2 - h_3, \text{кДж/кг} \quad (21)$$

3) Питома робота циклу дорівнює у даному випадку питомій роботі на привід компресора і розраховується як різниця $q_{\text{під}}$ і $q_{\text{від}}$. За абсолютним значенням ця робота дорівнює:

$$l = q_{\text{від}} - q_{\text{під}},$$

$$l = (h_2 - h_3) - (h_1 - h_4). \quad (22)$$

При дроселюванні $h_3=h_4$. Тоді, розкривши скобки у рівнянні, будемо мати:

$$l = h_2 - h_1, \text{ кДж/кг.} \quad (23)$$

Ту ж саму формулу отримаємо якщо роботу циклу будемо розглядати як роботу на привід компресора l_K , яка дорівнює наявній роботі адіабатного процесу l_H , що береться з протилежним знаком:

$$l = l_K, \quad l_K = -l_H,$$

$$l_H = -\Delta h_{12} = h_1 - h_2.$$

Тоді:
$$l = l_K = h_2 - h_1$$

4) Холодильний коефіцієнт обчислюється за рівнянням:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}. \quad (24)$$

5) Витрата холодильного агента, що циркулює в циклі, знаходиться з рівняння:

$$m = \frac{Q_0}{q_0}, \text{ кг/с.} \quad (25)$$

6) Об'ємну витрату холодильного агента визначимо за залежністю:

$$V_1 = m \cdot v_1, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (26)$$

де v_1 – питомий об'єм холодильного агента в точці 1, який знаходиться за табл.5, м³/кг.

7) Потужність, що витрачається на привід компресора обчислюється наступним чином:

$$N = m \cdot l, \text{ кВт} \quad (27)$$

8) Термодинамічна досконалість циклу ПКХУ з дросельним вентилям знайдеться в порівнянні з холодильною установкою, яка працює за зворотним циклом Карно, в тому ж інтервалі температур:

$$\eta_E = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_K} = \varepsilon \cdot \frac{T_{HC} - T_0}{T_{HC}} = \varepsilon \cdot \frac{T_K - T_0}{T_K}. \quad (28)$$

5. Подібні розрахунки проводяться, коли дросельний вентиль ПКХУ замінено детандером і, коли введено переохолодження холодильного агента у конденсаторі на 10°C. При цьому необхідно враховувати відмінність цих циклів:

1) **Цикл з переохолодженням.** Якщо переохолодження відбувається у конденсаторі, то змінюються формули для розрахунку q_0 і $q_{\text{КОН}}$. Все інше лишається без змін. Питома холодопродуктивність та питома навантаження конденсатора визначаються за рівняннями:

$$q_0^{\text{ПЕР}} = h_1 - h_{4'}, \text{ кДж/кг} \quad (29)$$

$$q_{\text{КОН}}^{\text{ПЕР}} = h_2 - h_{3'}, \text{ кДж/кг.} \quad (30)$$

Питома робота циклу лишилась незмінною.

2) **Цикл при наявності детандера.** Питома холодопродуктивність і питома навантаження конденсатора будуть такими ж, як і в циклі ПКХУ з дросельним вентилям, а питома робота циклу зміниться. Детандер і конденсатор, як відомо, у ПКХУ закріплені на одному валу. Якщо в компресорі робота витрачається, то в детандері вона корисно використовується. Холодильний агент у детандері адіабатно розширюється, охолоджується і виконує корисну роботу. Тоді:

$$l = l_K - l_D. \quad (31)$$

Оскільки процес у детандері і компресорі є адіабатним, то:

$$l_K = h_2 - h_1, \text{ а } l_D = h_3 - h_5. \quad (32)$$

6. Побудувати графіки залежності холодильного коефіцієнта та ексергетичного к.к.д. від температури охолодження об'єкта. Для цього провести розрахунки для різних значень температури охолодження об'єкта з інтервалом в $\pm 5^\circ\text{C}$ відносно заданої температури t_0 (3 – 4 точки).

7. Зробити висновки.

5 ВИМОГИ ДО ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи повинен обов'язково містити:

1. Титульний лист з зазначенням на ньому теми лабораторної роботи та номера варіанта.
2. Мету роботи та вихідні данні.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Роздруковані $T-s$ та $l_{gp}-h$ діаграми з нанесеним на них циклами ПКХУ.

5. Таблицю з термодинамічними параметрами для кожної точки циклу.
6. Розрахунок основних характеристик роботи ПКХУ.
7. Графіки залежності холодильного коефіцієнта та ексергетичного к.к.д. від температури охолодження об'єкта.
8. Короткі висновки по роботі.

6 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що називається процесом охолодження?
2. Як поділяються холодильні установки за рівнем температури охолодження?
3. Дайте класифікацію холодильних установок для отримання температур нижче -100°C .
4. До якого типу холодильних установок відносяться парокompресійні холодильні установки?
5. За якими циклами працюють холодильні установки і чому? Які особливості протікання циклів холодильних установок?
6. Чим цикли холодильних установок відрізняються від циклів теплових насосів?
7. Основні властивості холодильної установки, яка працює за циклом Карно. Які питомі характеристики для неї розраховуються? Чим визначається ефективність роботи?
8. Чим відрізняються холодильний коефіцієнт і коефіцієнт корисної дії холодильного циклу?
9. У $T-s$ - діаграмі в певному інтервалі температур накреслити цикл повітряної холодильної установки, еквівалентного циклу Карно та відповідного циклу Карно. Який з циклів холодильних установок має найбільший холодильний коефіцієнт?
10. Дати визначення поняттю ексергетичного коефіцієнта холодильної установки. Як він пов'язаний з холодильним коефіцієнтом?

11. Фактор Карно. Як він використовується при визначенні ексергетичного к.к.д. холодильних установок і теплових насосів?
12. Парокомпресійна холодильна установка, зображення її циклу в $T-s$ і $lgr-h$ діаграмах (за сухим ходом компресора). З яких процесів складається цей цикл?
13. Як визначаються питомі характеристики і холодильний коефіцієнт для зразкового циклу ПКХУ?
14. Як проводяться розрахунки, якщо замість дросельного вентиля у зразкову ПКХУ вводиться детандер?
15. Цикл ПКХУ з переохолодженням рідкого холодильного агента. Обчислення його характеристик.
16. Класифікація холодильних агентів, їх маркування (позначення) та властивості.

7 СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Процеси та апарати хімічної технології: Підручник: У 2ч. – Ч2/* Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, А.П. ГОТЛІНСЬКА, В.О. ЛЕЩЕНКО та ін.; За ред. Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО; Пер. з рос. Л.А. КОПІЄВСЬКОЇ. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – 540 с.
2. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.
3. *Дытнерский Ю.И.* Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1995. – 768 с.
4. *Чернобыльский И.И.* и др. Машины и аппараты химической промышленности. – М.: Машгиз, 1962. – 518 с.
5. *Плановский А.Н., Николаев П.И.* Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1987. – 493 с.
6. *Холодильные машины: Учебник.* Под общей редакцией проф. Тимофеевского Л.С. – Санкт-Петербург.: Политехника, 1997. – 991 с.
7. *www.et.dtu.dk/CoolPack.*
8. *Чеботарьов В.О., Беркута А.Д.* Технічна термодинаміка: Учбовий посібник – К.: Вища школа, 1969. – 204 с.
9. *Чеботарёв В.А., Босый В.В. Куделя П.П.* Основные расчёты по темам 1 и 2 законы термодинамики. – К.: КПИ, 1977. – 40 с.
10. *Кирилин В.А.* и др. Техническая термодинамика. Учебник для вузов. Изд. 2-е. – М: Энергия, 1983. – 416 с.
11. *Бэр Г.Д.* Техническая термодинамика. Перевод с немецкого. Под редакцией проф. Бродянского В.М. – М.: Мир, 1977. – 513 с.
12. *Бродянский В.М., Семенов А.Н.* термодинамические основы криогенной техники. – М.: Энергия, 1980. – 448 с.

ДОДАТОК

Вихідні данні до виконання роботи.

Варіант	$t_0, ^\circ\text{C}$	$t_k, ^\circ\text{C}$	$Q_0, \text{кВт}$	Холодоагент
1	-10	20	10	Ф-11
2	-15	20	12	Ф-12
3	-5	15	14	Ф-13
4	-20	10	18	Ф-170
5	-25	5	16	Ф-22
6	-25	20	20	Ф-23
7	-15	15	32	Ф-717 (Аміак, NH_3)
8	-10	25	28	Ф-1270
9	-5	20	30	Ф-290 (Пропан)
10	-10	15	24	Ф-744 (Вуглекислота, CO_2)
11	-10	15	12	Ф-11
12	-15	10	14	Ф-12
13	-5	25	18	Ф-13
14	-20	5	16	Ф-170
15	-25	10	15	Ф-22
16	-25	15	18	Ф-23
17	-15	10	25	Ф-717 (Аміак, NH_3)
18	-10	30	24	Ф-1270
19	-5	30	21	Ф-290 (Пропан)
20	-10	20	20	Ф-744 (Вуглекислота, CO_2)
21	-15	20	20	Ф-11
22	-15	15	32	Ф-12
23	-10	25	28	Ф-13
24	-5	20	30	Ф-170
25	-20	15	24	Ф-22
26	-10	15	12	Ф-23
27	-10	10	14	Ф-717 (Аміак, NH_3)
28	-5	25	18	Ф-1270
29	-20	5	16	Ф-290 (Пропан)
30	-15	10	15	Ф-744 (Вуглекислота, CO_2)