

**Волощук В.А.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Любицький С.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Поліщук І.А.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Поліщук М.А.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЗАСТОСУВАННЯ ХМАРНОЇ ПЛАТФОРМИ COLABORATORY ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕКСЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ ТЕПЛОАСОСНИХ УСТАНОВОК

*У статті представлено розроблення інтерактивного розрахункового середовища, яке базується на використанні відкритих онлайн-сервісів для широкого застосування ексергетичного аналізу й оптимізації теплоенергетичних процесів і систем. Це середовище підтримує збір, зберігання та засоби обробки даних і використовує програмне забезпечення з відкритим кодом: Google Colaboratory – хмарний сервіс для створення блокнотів за допомогою об'єктноорієнтованої мови програмування Python – і CoolProp – бібліотеку з розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл. Наведено приклад ексергетичного аналізу теплонасосних установок типу «повітря-вода» й «вода-вода» із застосуванням розробленого ресурсу. Запропоновано розрахункову схему теплонасосних установок і функції користувача для розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл. Наведено приклади розрахунку параметрів теплоносіїв в характерних точках теплонасосних установок та основних ексергетичних показників теплонасосних установок: ексергії палива, ексергії продукту, деструкції ексергії та ексергетичного коефіцієнта корисної дії з представленням результатів у вигляді графіків і таблиць. Використовуючи розроблений ресурс, було розраховано деструкцію ексергії в кожному елементі теплонасосних установок для різних робочих тіл і проведено порівняльний аналіз теплонасосних установок типу «повітря-вода» й «вода-вода» залежно від типу робочого тіла. Показано, що розподіл для запропонованих робочих тіл із боку формування деструкції ексергії в компонентах теплонасосних установок однаковий і що для обох типів теплонасосних установок найбільша сумарна деструкція ексергії відбувається у випадку використання R410A, а найменша – для R1234ze(Z). Також зазначено, що зі зміною типу робочого тіла найбільша зміна деструкції ексергії має відбуватися в дросельному вентилі, що зумовлено різною теплою пароутворення кожного робочого тіла. Досліджено, що приблизно однаковою для всіх наведених робочих тіл є також деструкція ексергії у випарнику й конденсаторі.*

**Ключові слова:** Python, Google Colaboratory, онлайн-сервіс, теплофізичні властивості робочих тіл, теплонасосна установка, ексергетичний аналіз, деструкція ексергії.

**Постановка проблеми.** Ексергетичний підхід є новим витком у теорії моделювання та аналізу об'єктів і систем теплоенергетики. На відміну від енергетичного аналізу, який найчастіше використовується в науковій та інженерній практиці, поєднання ексергетичного, економічного й екологічного методів оцінювання дозволяє визначити місце, значення, джерела,

вартість і негативний вплив на довкілля термодинамічних втрат у процесах передачі й перетворення енергії [1].

Методи ексергетичного аналізу найбільшою мірою розроблено й апробовано в промисловій теплоенергетиці [2]. Разом із тим в останній час з'явився інтерес до використання цих методів у сфері теплозабезпечення будівель [3], у системах

керування об'єктами теплоенергетики [4], а також для діагностування цих об'єктів [5].

Однією з основних перешкод широкого впровадження методів ексергетичного аналізу на практиці є необхідність виконання досить складних і нестандартних математичних розрахунків, які вимагають додаткового часу й зусиль і не завжди можуть реалізуватися за допомогою існуючих програмних продуктів [6]. Для ширшого залучення цих методів у практику проєктування та експлуатації теплоенергетичних систем є потреба у створенні відповідних легкодоступних і зручних розрахункових засобів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Більшість комп'ютерних програм, що з'явилася останнім часом, комерційні. Зусилля, спрямовані на вдосконалення таких продуктів, базуються на Першому законі термодинаміки й методах класичної економіки (наприклад, AspenPlus, Pro / II, EES, Thermoflow, Gate Cycle, Epsilon Professional тощо) [7]. Методи ексергетичного аналізу в них використовуються досить рідко або взагалі не використовуються [8]. Більшість такого програмного забезпечення працює як «чорний ящик». Тобто вони не надають можливості маніпуляції аналітичними залежностями або здійснення покрокового аналізу й зміни алгоритму реалізації програми. Частина таких ресурсів мають досить вузький спектр застосування. З метою реалізації нестандартних задач дослідники змушені вдаватися до поєднання та комбінування декількох програм. Наприклад, одна програма (REFPROP, FLUIDS, CHEMCAD, Thermo-Calc тощо) визначає теплофізичні властивості робочих тіл, інша програма (AspenPlus, Pro / II, EES, Thermoflow, Gate Cycle, Epsilon Professional тощо) моделює енергетичну установку на основі методології закону збереження та перетворення енергії (енергетичний або ентальпійний підхід), а ще інша програма (MathCAD, Maple, Matlab, Mathematica тощо) використовується для ексергетичного аналізу. Так зроблено, зокрема, в роботі [8]. Для реалізації ексергоекономічного аналізу автор [8] експортував з існуючих програмних пакетів (Gatex, Epsilon Professional, Aspen Plus, EES, Excel) результати моделювання у власноруч розроблену програму за допомогою C++. Варто зауважити, що не у всіх випадках таке безпосереднє інтегрування різних пакетів можна легко реалізувати. Потрібно застосовувати попередню обробку (preprocessing). Мало того, в багатьох випадках такі програмні продукти комерційні, тобто потребують затрат коштів на отримання ліцензії та доступні для обмеженого кола дослідників.

У більшості випадків математичне моделювання теплоенергетичних процесів потребує визначення термодинамічних і фізичних властивостей робочих тіл, що використовуються в процесах передачі й перетворення енергії. Зважаючи на широкий вибір робочих тіл і необхідність багатоваріантного аналізу, нині вже непрактично нереально й ненадійно використовувати дані з теплофізичних властивостей теплоносіїв у вигляді таблиць і графіків. Зараз пропонується досить широкий набір комп'ютерних програм із розрахунку властивостей робочих тіл (наприклад, REFPROP, ChemCad, Thermo-Calc тощо). Але знову ж таки ці програми мають досить вузькі можливості їх інтеграції з іншими програмними пакетами, де власне й виконується моделювання теплоенергетичних процесів. Крім того, такі програмні пакети потребують додаткової інсталяції на персональному комп'ютері, постійних оновлень, а також потребують фінансових затрат на придбання.

Нова парадигма у сфері інформаційних технологій – «хмарні» обчислення – ефективне рішення для забезпечення гнучкої та динамічної інфраструктури для різних сфер наукових та інженерних розрахунків із доступом на вимогу. До переваг такої технології можна віднести економію коштів, доступність, динамічність, гнучкість тощо [9]. Підходи й реалізацію «хмарних» розрахунків у теплоенергетиці запропоновано, зокрема, в [10; 11]. Разом із тим такі підходи передбачають застосування платних ліцензій для відповідного програмного забезпечення.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення методів організації процесів моделювання, які б забезпечили практичне впровадження розрахункових моделей на основі термодинамічних підходів, зокрема ексергетичному, були легкодоступними, зручними, не потребували платної ліцензії та спиралися на сучасні інформаційні технології та Інтернет. Реалізацію запропонованого методу потрібно представити на прикладі ексергетичного аналізу теплонасосної установки (далі – ТНУ).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для реалізації поставлених задач у роботі пропонується використовувати мову програмування Python [12], яка широко застосовується в науковій області для досліджень і розв'язування прикладних завдань. Python працює майже на всіх відомих платформах, є відкритим і вільним програмним забезпеченням, має велику кількість бібліотек.

Реалізацію розрахунку пропонується здійснювати у вигляді спеціальних онлайн документів-блокнотів – Jupyter Notebook. Такий «блокнот» об'єднує

програмний код і результат його виконання в єдиний документ, який містить математичні рівняння, візуалізацію, пояснювальний текст тощо. Які провайдер хмарного розрахунку пропонується сервіс Google Colab або Colaboratory [13], який дозволяє створювати блокноти Jupyter із середовищем виконання Python і зберігати їх на Google-Диску. Ця платформа дає можливість реалізовувати розрахунки безпосередньо в хмарі без встановлення локального програмного забезпечення та купівлі ліцензії. Для роботи потрібен лише браузер і доступ до Інтернету для редагування та перегляду файлів.

Розрахунок теплофізичних властивостей робочих тіл пропонується реалізовувати за допомогою бібліотеки CoolProp [14] – фреймворку з відкритим програмним кодом. Ця бібліотека написана на C++ з обгортками, доступними для більшості мов програмування та комп'ютерних програм. У CoolProp розрахунок властивостей робочих тіл базується на фундаментальному рівнянні Гельмгольца.

Для ТНУ типу «повітря-вода» прийняті такі параметри: температура низькопотенційного джерела теплоти (зовнішнього повітря) знижується у випарнику від 20°C до 15°C; вода нагрівається в конденсаторі від 50°C до 60°C; мінімальний температурний напір у випарнику дорівнює 12 К, а в конденсаторі становить 5 К. У випадку викорис-

тання ТНУ типу «вода-вода» низькопотенційне джерело теплоти охолоджується у випарнику від 8°C до 5°C; нагрів води в конденсаторі такий же, як і в ТНУ типу «повітря-вода» – від 50°C до 60°C; мінімальний температурний напір у випарнику й конденсаторі становить 5 К.

Реалізація запропонованого методу моделювання та ексергетичного аналізу ТНУ розміщено за URL-адресою [https://colab.research.google.com/drive/184OntEULIDlzOvMT\\_YttcH7HWsYXZmDm#scrollTo=G299THjqC64G](https://colab.research.google.com/drive/184OntEULIDlzOvMT_YttcH7HWsYXZmDm#scrollTo=G299THjqC64G).

Розрахункова схема ТНУ наведена на рис. 1, де у випарнику (EV) випаровується та перегрівається робоче тіло ТНУ шляхом охолодження низькопотенційного джерела від температури  $t_{EV,in}$  до  $t_{EV,out}$ . У компресорі (CM) відбувається стиснення робочого тіла, унаслідок чого підвищується його температура. У конденсаторі (CD) перегріта пара робочого тіла охолоджується та конденсується, нагріваючи водночас теплоносієм споживача від температури  $t_{CD,in}$  до  $t_{CD,out}$ . Після конденсатора робоче тіло ТНУ надходить у дросельний вентиль (TV), де знижує свій тиск і температуру, частково перетворюючись на пару, і далі надходить у випарник для повного випаровування та перегріву.

Отже, спочатку за допомогою команди `pip` встановлюється бібліотека CoolProp – бібліотека для розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл (рис. 2).

На рис. 3 наведено створення функцій користувача для розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл. Таке рішення висувається для зручності.

У пакеті CoolProp пропонується свій синтаксис таких функцій. Наприклад, для розрахунку питомої ентальпії в однофазній області використовується такий варіант:

$$\text{PropsSI}('H', 'P', p, 'T', T, wf), \quad (1)$$

де 'H' – це параметр, що розраховується, питома ентальпія;

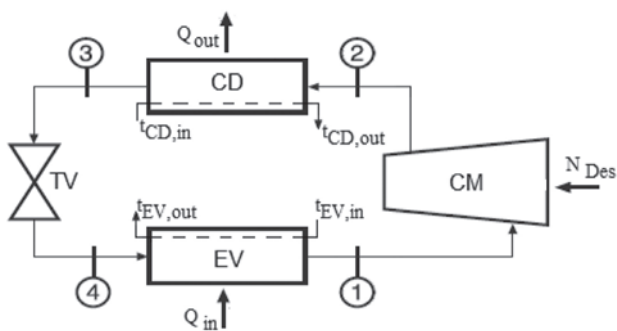


Рис. 1. Розрахункова схема ТНУ

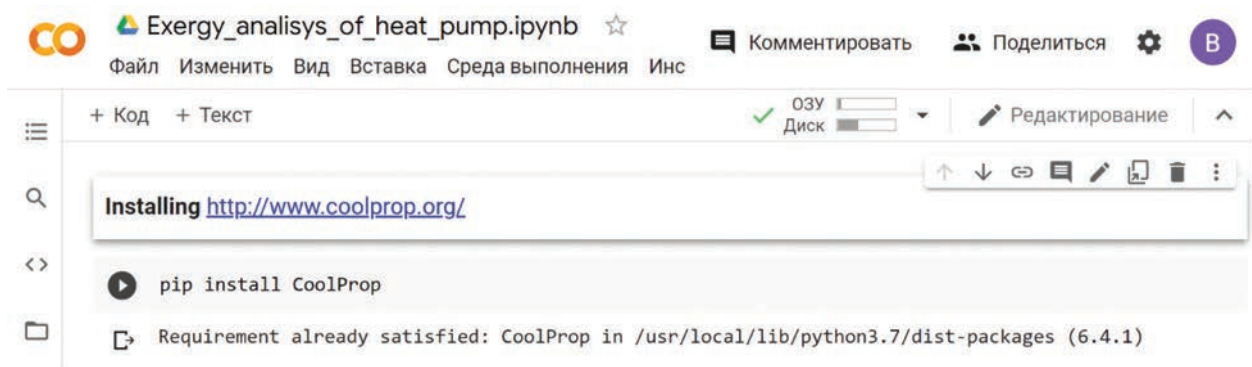


Рис. 2. Встановлення бібліотеки CoolProp

"P" – абсолютний тиск, який є першим аргументом і значення якого вводиться в наступну комірку після "P";

"T" – абсолютна температура, що є другим аргументом і вводиться в комірку після "T";

wf – тип робочого тіла.

Варто зауважити, що у формулу необхідно підставляти параметри в безрозмірному вигляді, але з урахуванням того, що числове значення тиску повинно бути таким, якби воно вимірювалося в Па, а абсолютна температура – в Кельвінах. Зна-

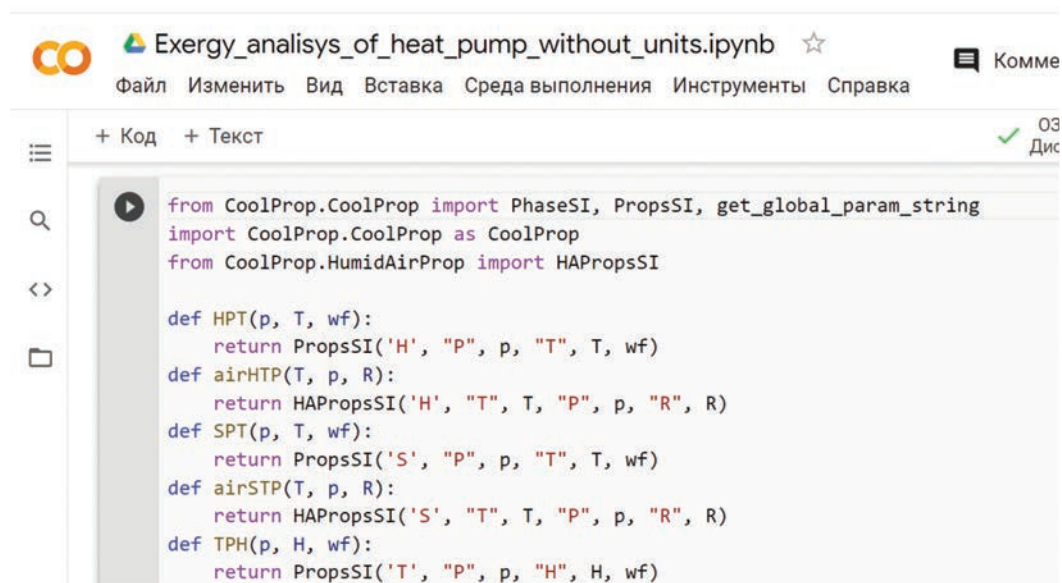
чення питомої ентальпії відповідає одиниці вимірювання Дж/кг.

Як показала практика, такий синтаксис не дуже зручний, оскільки займає багато місця. Тому в роботі за допомогою оператора def створено коротші функції. Наприклад, функцію (1) запропоновано у вигляді:

$$\text{HPT}(p, T, wf), \quad (2)$$

де замість p та T необхідно підставляти чисельні значення абсолютного тиску й температури (рис. 2).

На наступному етапі вводяться вихідні параметри (рис. 4).



```

Exergy_analysys_of_heat_pump_without_units.ipynb
Файл  Изменить  Вид  Вставка  Среда выполнения  Инструменты  Справка  Комме

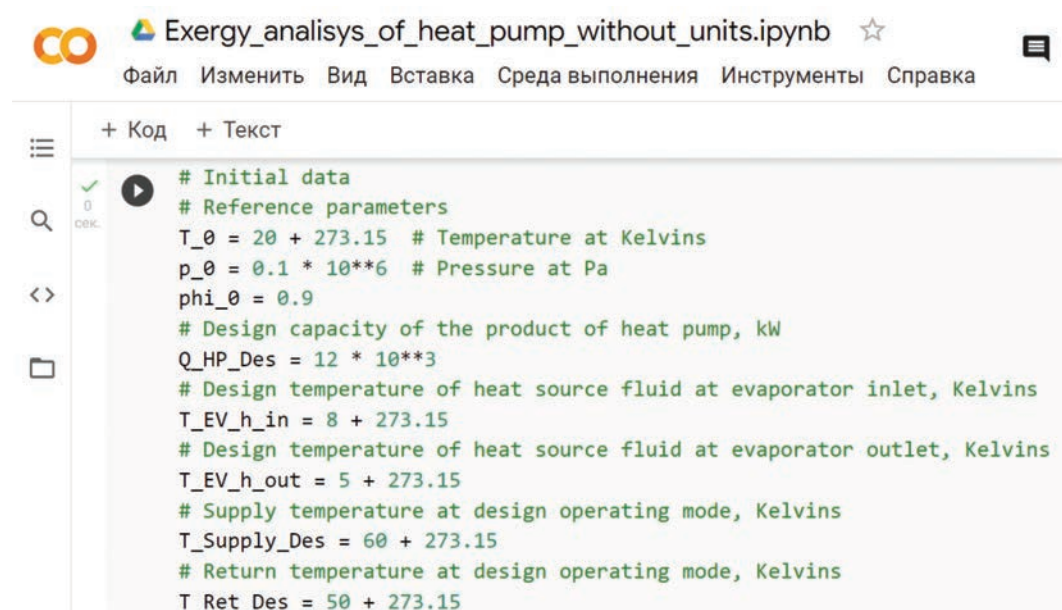
+ Код  + Текст  03 Дис

from CoolProp.CoolProp import PhaseSI, PropsSI, get_global_param_string
import CoolProp.CoolProp as CoolProp
from CoolProp.HumidAirProp import HAPropsSI

def HPT(p, T, wf):
    return PropsSI('H', "P", p, "T", T, wf)
def airHPT(T, p, R):
    return HAPropsSI('H', "T", T, "P", p, "R", R)
def SPT(p, T, wf):
    return PropsSI('S', "P", p, "T", T, wf)
def airSPT(T, p, R):
    return HAPropsSI('S', "T", T, "P", p, "R", R)
def TPH(p, H, wf):
    return PropsSI('T', "P", p, "H", H, wf)

```

Рис. 3. Створення функцій користувача для розрахунку властивостей робочих тіл на основі функцій бібліотеки CoolProp



```

Exergy_analysys_of_heat_pump_without_units.ipynb
Файл  Изменить  Вид  Вставка  Среда выполнения  Инструменты  Справка

+ Код  + Текст

# Initial data
# Reference parameters
T_0 = 20 + 273.15 # Temperature at Kelvins
p_0 = 0.1 * 10**6 # Pressure at Pa
phi_0 = 0.9
# Design capacity of the product of heat pump, kW
Q_HP_Des = 12 * 10**3
# Design temperature of heat source fluid at evaporator inlet, Kelvins
T_EV_h_in = 8 + 273.15
# Design temperature of heat source fluid at evaporator outlet, Kelvins
T_EV_h_out = 5 + 273.15
# Supply temperature at design operating mode, Kelvins
T_Supply_Des = 60 + 273.15
# Return temperature at design operating mode, Kelvins
T_Ret_Des = 50 + 273.15

```

Рис. 4. Введення вихідних параметрів

Наступний крок – розрахунок параметрів теплоносіїв. Для прикладу, на рис. 5 наведено визначення питомої ентальпії та ентропії теплоносія низькопотенційного джерела енергії на вході у випарник ТНУ. У такому випадку використовуються створені (див. рис. 3) відповідні функції. Водночас передбачено врахування типу низькопотенційного джерела: вологого повітря з відповідними значеннями абсолютної температури, тиску й відносної вологості чи води з відповідними значеннями абсолютного тиску й температури.

На рис. 6 наведено фрагмент розрахунку параметрів у характерних точках ТНУ. Усі ці величини необхідні для реалізації ексергетичного аналізу.

На рис. 7 наведено фрагмент розрахунку таких основних ексергетичних характеристик компресора ТНУ: ексергії палива, ексергії продукту, деструкції ексергії та ексергетичного ККД. Водночас ураховано різне співвідношення параметрів робочого тіла ТНУ щодо параметрів відліку ексергії.

Результати розрахунків можна представити у вигляді графіків, таблиць або у вигляді чисел із поясненнями, як це наведено, наприклад, на рис. 8 і в табл. 1.

Отже, використовуючи розроблений ресурс, було розраховано деструкцію ексергії в кожному елементі ТНУ для робочих тіл, які зараз використовуються або пропонуються використовувати в майбутньому. Результати наведено на рис. 9 та 10.

Більшість теперішніх ТНУ використовують фторвуглеводні (зокрема, R410A, R134a, R32, R407c, R152a), які мають менший негативний вплив на довкілля в порівнянні з хлорфторвуглеводнями. Хоча через значний потенціал глобального потепління (GWP) зараз проводяться дослідження щодо можливості застосування альтернативних робочих тіл: гідрофторолефінів (наприклад, R1234yf, R1234ze) [15] і вуглеводнів (наприклад, R290, R1270) [16].

З рис. 9 і 10 бачимо, що для заданих параметрів ТНУ типу «повітря-вода» й «вода-вода» розподіл

```

Exergy_analysys_of_heat_pump_without_units.ipynb
Файл  Изменить  Вид  Вставка  Среда выполнения  Инструменты  Справка

+ Код  + Текст

if wf_EV_h == 'Air':
    h_EV_h_in_Des = airHTP(T_EV_h_in, p_EV_in, phi_0)
if wf_EV_h == 'Water':
    h_EV_h_in_Des = HPT(p_EV_in, T_EV_h_in, wf_EV_h)

if wf_EV_h == 'Air':
    h_EV_h_in_Des_0 = airHTP(T_0, p_EV_in, phi_0)
if wf_EV_h == 'Water':
    h_EV_h_in_Des_0 = HPT(p_EV_in, T_0, wf_EV_h)
    
```

Рис. 5. Приклад розрахунку питомої ентальпії та ентропії теплоносія низькопотенційного джерела енергії на вході у випарник ТНУ

```

Exergy_analysys_of_heat_pump_without_units.ipynb
Файл  Изменить  Вид  Вставка  Среда выполнения  Инструменты  Справка  Комментировать

+ Код  + Текст  ОЗУ  Диск

# Pressure of the working fluid at the condenser inlet
p_2_Des = PSVT(T_Supply_Des + delta_T_CD_h, wf)
# Pressure of the working fluid at the condenser outlet
p_3_Des = p_2_Des
# Temperature of the working fluid at the condenser outlet
T_3_Des = TSLP(p_3_Des, wf)
# Liquid temperature of the working fluid on the saturation line in the condenser
T_sl_CD_Des = T_3_Des
# Liquid specific entropy of the working fluid on the saturation line in the condenser
s_sl_CD_Des = SSLT(T_sl_CD_Des, wf)
    
```

Рис. 6. Фрагмент розрахунку параметрів у характерних точках ТНУ

запропонованих робочих тіл із боку формування деструкції ексергії в компонентах ТНУ – однаковий. Для обох типів ТНУ найбільша сумарна деструкція ексергії відбувається у випадку вико-

ристання R410A, а найменша – для R1234ze(Z). Якщо проаналізувати зміну деструкції ексергії в кожному компоненті ТНУ, то можна зробити висновок, що в основному зі зміною типу

Таблиця 1

Значення ексергетичних характеристик ТНУ

Component/Value	Exergy of fuel,kW	Exergy of product,kW	Exergy destruction, kW	Exergetic efficiency
CM	4.21	3.54	0.67	0.84
CD	1.6	1.28	0.32	0.8
TV	1.94	0.62	1.31	0.32
EV	0.57	0.38	0.19	0.66
HP, total	3.78	1.28	2.5	0.34

```

Exergy_analysys_of_heat_pump_without_units.ipynb
Файл  Изменить  Вид  Вставка  Среда выполнения  Инструменты

+ Код  + Текст

# Exergy of fuel in the compressor
if T_1_Des < T_0 < T_2_Des:
    E_F_CM_Des = E_5_Des + E_1_T_Des
if T_0 < T_1_Des:
    E_F_CM_Des = E_5_Des
# Exergy of product in the compressor
if T_1_Des < T_0 < T_2_Des:
    E_P_CM_Des = E_2_M_Des - E_1_M_Des + E_2_T_Des
if T_0 < T_1_Des:
    E_P_CM_Des = E_2_Des - E_1_Des
# Exergy destruction in the compressor
E_D_CM_Des = E_F_CM_Des - E_P_CM_Des
# Exergetic efficiency of the compressor
epsilon_CM = E_P_CM_Des / E_F_CM_Des
    
```

Рис. 7. Фрагмент розрахунку основних ексергетичних характеристик компресора ТНУ

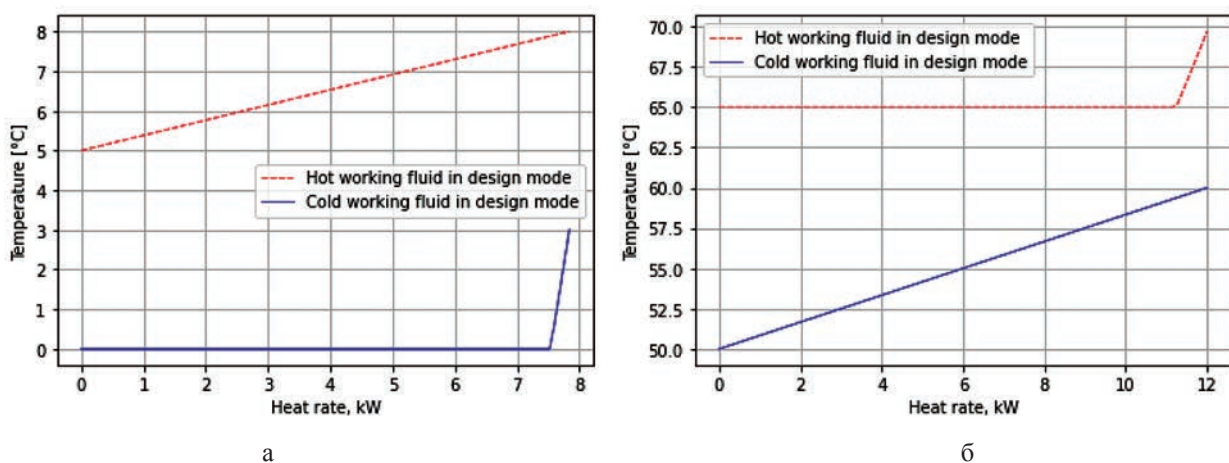


Рис. 8. QT-діаграми випарника (а) та конденсатора (б)

робочого тіла найбільша зміна деструкції ексергії має відбуватися в дросельному вентилі. В інших компонентах деструкція ексергії суттєво не змінюється, за виключенням R32.

Якщо проаналізувати цикли ТНУ з різними робочими тілами в Ts-діаграмі, то можна дійти висновку, що такий характер зміни деструкції ексергії в компонентах ТНУ, який наведено на рис. 9 та 10, зумовлений в основному різною теплою пароутворення кожного робочого тіла. На рис. 11 показано цикли ТНУ в Ts-діаграмі для R1234ze(Z), R1234ze(E) та R1234yf.

Деструкцію ексергії можна визначити за формулою Гюї-Стодоли:

$$\dot{E}_{D,k} = T_0 \cdot \dot{m} \cdot \Delta s, \quad (3)$$

де  $\dot{E}_{D,k}$  – деструкція ексергії в k-му компоненті, Вт;  
 $T_0$  – температура навколишнього середовища, К;  
 $\dot{m}$  – масова витрата робочого тіла, кг / с;  
 $\Delta s$  – генерація ентропії у процесі, Дж / (кг · К).

Отже, якщо проаналізувати процес дроселювання 3–4 (рис. 11), то можна побачити, що генерація питомої ентропії R1234ze(Z), R1234ze(E)

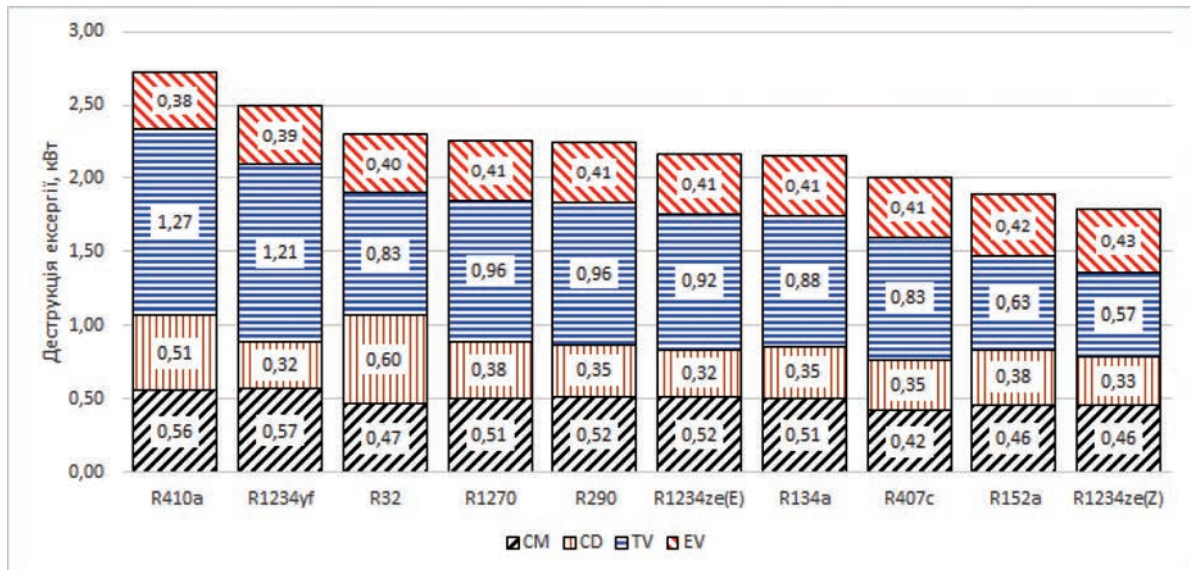


Рис. 9. Значення деструкції ексергії в компонентах ТНУ типу «повітря-вода» залежно від типу робочого тіла

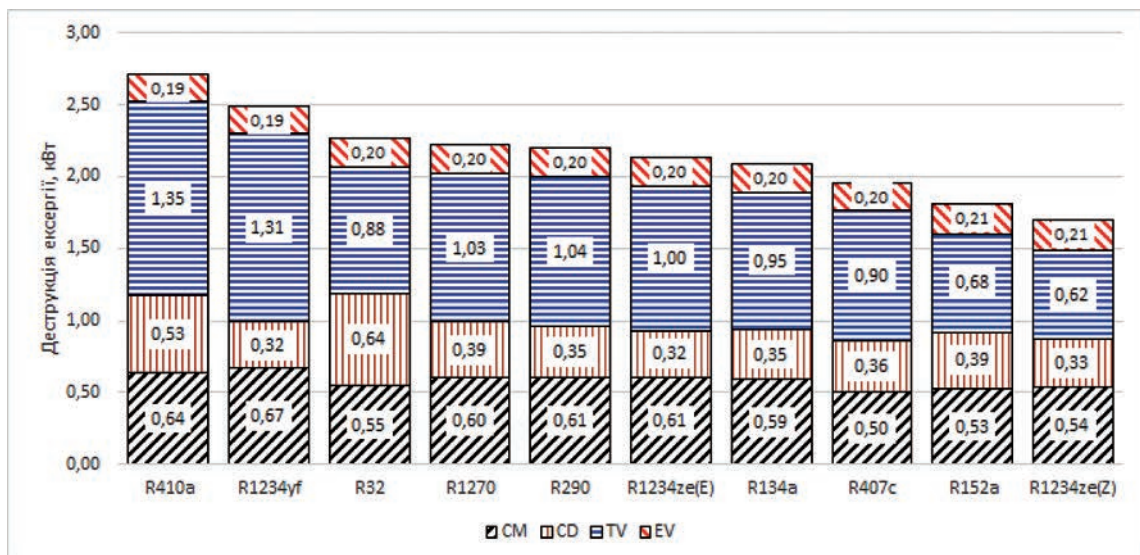


Рис. 10. Значення деструкції ексергії в компонентах ТНУ типу «вода-вода» залежно від типу робочого тіла

та R1234yf майже однакова (лінії дроселювання паралельні). Разом із тим саме через малу теплоту пароутворення R1234yf витрата такого робочого тіла буде найбільшою серед цих трьох робочих тіл. Тоді згідно з формулою (3) деструкція ексергії в дросельному вентилі з робочим тілом R1234yf буде найбільшою, а для R1234ze(Z) – найменшою. Що ж стосується процесу стиснення 1–2, то з Ts-діаграми на рис. 11 можна зробити висновок, що у випадку використання R1234ze(Z) питома генерація ентропії буде найбільша серед цих трьох робочих тіл, а для R1234yf – найменша. Це також можна виявити на основі розрахункових значень ентропії в характерних точках, отриманих за допомогою запропонованого ресурсу. Отже, визначено, що у випадку використання R1234yf генерація ентропії в процесі стискання рівна 21 Дж / (кг · К), а для R1234ze(Z) – 29 Дж / (кг · К). Разом із тим значення витрати для R1234yf є більшим, а для R1234ze(Z) – меншим. У результаті згідно з формулою (3) деструкція ексергії в процесі стиснення цих робочих тіл приблизно однакова (рис. 10).

Приблизно однакова для всіх наведених робочих тіл також деструкція ексергії у випарнику й конденсаторі. Це можна пояснити таким чином. У випадку передачі теплоти в теплообміннику, наприклад, випарнику питома генерація ентропії, віднесена на 1 кг робочого тіла ТНУ, буде визначатися за формулою:

$$\Delta s = \frac{\dot{m}_{air(water)}}{\dot{m}} \cdot (s_{EV,in} - s_{EV,out}) - (s_1 - s_4), \quad (4)$$

де  $\dot{m}_{air(water)}$  – витрата низькопотенційного джерела енергії (повітря або вода), кг / с;

$s_{EV,in}, s_{EV,out}$  – питома ентропія низькопотенційного джерела енергії на вході й виході з випарника, Дж / (кг · К).

Отже, для всіх робочих тіл ТНУ добуток  $\dot{m}_{air(water)} \cdot (s_{EV,in} - s_{EV,out})$  однаковий. Разом із тим, чим більша теплота пароутворення, тим менша витрата й тим більший доданок  $\frac{\dot{m}_{air(water)}}{\dot{m}} \cdot (s_{EV,in} - s_{EV,out})$ , а також різниця  $s_1 - s_4$ . У результаті генерація ентропії у випадку використання робочого тіла з більшою теплотою пароутворення зростає, а через зменшення витрати робочого тіла деструкція ексергії для всіх випадків приблизно однакова.

#### Список літератури:

1. Morosuk T., Tsatsaronis G. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems. *Energy*. 2019. Vol. 169. P. 238–246.
2. Sciubba E., Wall G. A brief Commented History of Exergy From the Beginnings to 2004. *International Journal of Thermodynamics*. 2007. Vol. 10. No. 1. P. 1–26.
3. Hepbasli A. Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16 (1). P. 73–104.

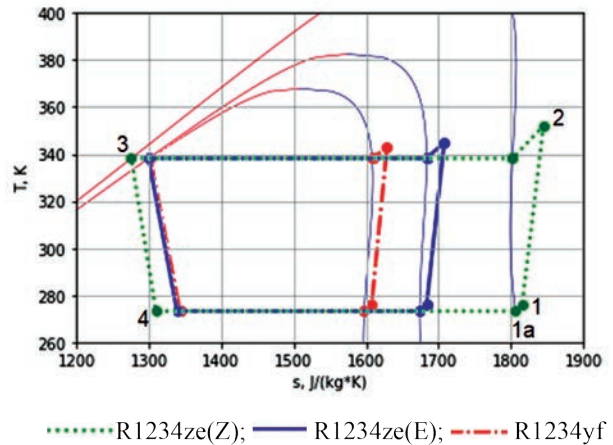


Рис. 11. Ts-діаграми ТНУ типу «вода-вода» залежно від типу робочого тіла

**Висновки.** У роботі запропоновано розвиток відкритого, інтерактивного середовища, яке базується на залученні хмарних технологій, для широкого впровадження на практиці методології ексергетичного аналізу теплоенергетичних систем.

Таке середовище спирається на використання Jupyter блокнотів, створених мовою програмування Python, і сервісу Google Colab для їх редагування, збереження та виконання. Такий підхід дає можливість відмовитися від спеціалізованих програмних продуктів і платних ліцензій для них.

Передбачено розрахунок теплофізичних властивостей робочих тіл, інтерактивні й відкриті алгоритми й інструменти для реалізації ексергетичного аналізу з використанням сучасних математичних методів розрахунків, швидкий, універсальний і зручний доступ до розрахунків за допомогою мережі Інтернет.

Реалізовано ексергетичний аналіз ТНУ типу «повітря-вода» й «вода-вода» з різними робочими тілами. З'ясовано, що деструкція ексергії в таких установках менша (а енергетична ефективність, відповідно, більша) для тих розглянутих робочих тіл, для яких теплота пароутворення – більша.

Стаття підготовлена в рамках виконання проекту «Розроблення техніко-технологічних схем і систем керування теплозабезпечення населених пунктів на основі термодинамічних підходів» (номер державної реєстрації – НДР 0120U102168).



4. Sangi R., Müller D. Application of the second law of thermodynamics to control: A review. *Energy*. 2019. Vol. 174. P. 938–953.
5. Wang L., Fu P., Wang N., Morosuk T., Yang Y., Tsatsaronis G. Malfunction diagnosis of thermal power plants based on advanced exergy analysis: The case with multiple malfunctions occurring simultaneously. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 148. P. 1453–1467.
6. Morosuk T., Tsatsaronis G. Strengths and limitations of advanced exergetic analyses. *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* : Conference, November 15–21, 2013. San Diego, California (USA), 2013. P. 1–11.
7. Jebaraj S., Iniyar S. A review of energy models. *Renew Sustain Energy Rev*. 2006. Vol. 10 (4). P. 283–311.
8. Zhao Z. Computer Program for the Exergoeconomic Analysis of Energy Conversion Plants : Doctoral thesis ; Technischen Universität Berlin, 2015. 153 S.
9. Furht B., Escalante A. Handbook of Cloud Computing. New York : Springer, 2010. 634 p.
10. Ochkov V., Orlov K., Voloshchuk V. Thermal Engineering Studies with Excel, Mathcad and Internet. Switzerland : Springer international publishing, 2016. 307 p.
11. Voloshchuk V.A. On-line, interactive tools and algorithms for thermal calculations of heat pumps. *Program and Proceedings* : The 13th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI-2016), Kaunas, Lithuania, May, 26–27, 2016. Kaunas, 2016. P. II-72–II-81.
12. Python.org. URL: <https://www.python.org> (дата звернення: 15.06.2021).
13. Google Colab. URL: <https://colab.research.google.com> (дата звернення: 15.06.2021).
14. Bell I.H., Wronski J., Quoilin S., Lemort V. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2014. Vol. 53 (6). P. 2498–2508.
15. Nawaz K., Shen B., Elatar A., Baxter V., Abdelaziz O. R-1234yf and R-1234ze(E) as Low-GWP Refrigerants for Residential Heat Pump Water Heaters. *International Journal of Refrigeration*. 2017. Vol. 82. P. 348–365.
16. Nawaz K., Shen B., Elatar A., Baxter V., Abdelaziz O. R290 (propane) and R600a (isobutane) as natural refrigerants for residential heat pump water heaters. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 127. P. 870–883.

#### **Voloshchuk V.A., Liubyt'skyi S.V., Polishchuk I.A., Polishchuk M.A. APPLICATION OF CLOUD PLATFORM COLABORATORY FOR IMPLEMENTATION OF EXERGETIC ANALYSIS OF HEAT PUMP SYSTEMS**

*The paper presents the development of an interactive computing environment based on the use of open online services for the widespread use of exergy analysis and optimization of thermal processes and systems. This environment supports the collection, storage and processing of data and uses open source software: Google Collaboratory – a cloud service for developing notebooks using the object-oriented programming language Python and CoolProp – a library for calculating the thermophysical properties of working bodies. An example of exergy analysis of air-to-water and water-to-water heat pumps (HP) on the base of the developed service is given. The calculation scheme of HP and user functions for calculation of thermophysical properties of working bodies are offered. Examples of calculation of parameters and the main exergetic variables (fuel of exergy, product of exergy, exergy destruction and exergetic efficiency) of HP are provided in the form of graphs and tables. On the base of the developed resource, the exergy destruction in each component of HP for different working fluids was calculated and a comparison between air-water and water-water HPs was performed. It has been shown that the distribution of exergy destruction in HP components within the proposed working fluids is almost the same. For both types of HPs the largest total exergy destruction belongs to the system using R410A, and the smallest – to the system with R1234ze (Z). It is also found that with the change of the type of working fluid the largest change in exergy destruction belongs to the throttle valve and is due to the different value of heat of vaporization of each working fluid. It had been also shown that the exergy destruction in the evaporator and condenser is approximately the same for the all analyzed working bodies.*

**Key words:** Python, Google Collaboratory, online service, thermophysical properties of working fluids, heat pump, exergy analysis, destruction of exergy.