

DOI: 10.63527/1607-8829-2026-1-33-44

Вихор Л.М.¹ (<https://orcid.org/0000-0002-8065-0526>),
Коцур М.П.² (<https://orcid.org/0000-0002-4072-3524>),
Хриков В.К.² (<https://orcid.org/0009-0001-5093-3859>),
Черкез Р.Г.^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0002-7218-6815>)

¹Інститут термоелектрики НАН України та МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна

Corresponding author: Вихор Л.М., e-mail: vikhorl@ukr.net

Комп'ютерне моделювання нестационарного режиму роботи термоелектричної холодильної камери медичного призначення

У роботі запропоновано модель термоелектричної холодильної камери медичного призначення, яка враховує тепловий опір та теплосмність всіх основних елементів її конструкції, що забезпечує наближеність моделювання процесу охолодження камери до реальних умов її експлуатації. Описано математичний метод моделювання характеристик нестационарного процесу охолодження такої камери, який ґрунтується на розв'язуванні квазістационарних рівнянь теплового балансу на межах між основними елементами моделі холодильника у сукупності з розв'язуванням стационарної крайової задачі для знаходження розподілу температури і теплового потоку в термоелектричних вітках. Розроблено алгоритм і комп'ютерний засіб для розрахунку характеристик і параметрів охолодження камери в нестационарному режимі її роботи. Комп'ютерна програма дозволяє аналізувати вплив конструкції термоелектричних модулів і режиму їх живлення на ефективність процесу охолодження камери, а отримані результати використовувати для вдосконалення конструкції ТЕ модулів та оптимізації режимів їх роботи.

Ключові слова: термоелектрична холодильна камера, нестационарний режим, комп'ютерне моделювання, термоелектричний модуль.

Цитування: Вихор Л.М., Коцур М.П., Хриков В.К., Черкез Р.Г. (2026). Комп'ютерне моделювання нестационарного режиму роботи термоелектричної холодильної камери медичного призначення. *Термоелектрика*, (1), 33–44. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2026-1-33-44>

Отримано: 20.02.2026; Переглянуто: 14.03.2026; Опубліковано: 31.03.2026

© 2026 Автори. Це стаття з відкритим доступом, що розповсюджується відповідно до умов ліцензії Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Вступ

Холодильні камери медичного призначення широко застосовуються для зберігання та транспортування біологічних матеріалів, лікарських препаратів, вакцин, донорської крові та трансплантаційних органів, для яких стабільність температурного режиму є критичною умовою забезпечення якості та безпеки використання. Відхилення температури навіть на кілька градусів або її короточасне коливання можуть призводити до деградації біологічних властивостей зразків в камері, що обумовлює підвищені вимоги до точності та надійності систем охолодження медичних камер різного призначення.

Для сучасних медичних камер дедалі більш поширено використовуються термоелектричні (ТЕ) охолоджувачі [1–8], які відрізняються від інших систем охолодження компактністю, відсутністю рухомих частин, високою надійністю та можливістю точного регулювання температури. Зокрема, в роботі [1] розглянуто медичні термоелектричні холодильні камери малого об'єму (від 5 до 20 л), які застосовуються для зберігання фармацевтичних препаратів і біологічних реагентів. Камери характеризуються компактними розмірами і низьким енергоспоживанням. Автори відзначають суттєвий вплив нестационарних теплових процесів на стабільність температурного поля всередині камери.

У роботі [4] наведено приклад медичної камери для зберігання фармацевтичних препаратів. В камері, розміри якої 400 × 300 × 300 мм, реалізований активний повітряний теплообмін, а тепловідведення від тепловиділяючої поверхні термоелектричних модулів здійснюється алюмінієвими радіаторами із примусовою вентиляцією. Автори підкреслюють, що ефективність роботи системи суттєво залежить від динаміки теплообміну між внутрішнім об'ємом камери та елементами, які її охолоджують.

Окрему групу складають спеціалізовані медичні охолоджувані камери та пристрої локального призначення, зокрема системи для охолодження біологічних рідин або хірургічних інструментів [5–8]. Такі пристрої мають невеликий об'єм (до 1–2 л), але працюють в режимі швидкої зміни температури, що вимагає точного врахування нестационарних теплових процесів у камері та в термоелектричних елементах.

У статті [9] розглядається динамічна поведінка двокаскадних термоелектричних охолоджувачів, які є одними з найпоширеніших конструкцій для ефективного охолодження в практичних медичних і технічних застосуваннях. Автори фокусуються на аналізі часових характеристик теплового режиму під впливом імпульсних струмів, які змінюють теплові потоки в системі, і показують, як ці динамічні процеси впливають на стабільність температури в об'ємі, який охолоджується. В роботі порівнюється поведінка температури за умов традиційних та модифікованих керованих режимів живлення ТЕ охолоджувача, що дозволяє виявити оптимальні умови для швидкого виходу на задану температуру і зменшення температурних коливань. Такий підхід підкреслює важливість врахування нестационарних теплових процесів у моделюванні та проектуванні термоелектричних камер охолодження, особливо для медичних та лабораторних пристроїв, де необхідна висока точність підтримання температури.

Значна частина наукових досліджень присвячена аналізу стаціонарних режимів роботи термоелектричних охолоджувачів, оптимізації геометрії термоелементів, підбору матеріалів та вдосконаленню систем теплообміну. Водночас в реальних умовах експлуатації медичних холодильних камер переважають нестационарні процеси [10–13], пов'язані з запуском системи в робочий режим, відкриванням камери, зміною теплового навантаження, розміщенням нових об'єктів або коливаннями температури навколишнього середовища.

Особливу актуальність ця проблема має для медичних застосувань, де необхідно забезпечити швидке досягнення заданої температури та мінімальні температурні коливання в умовах змінного теплового навантаження. У зв'язку з цим актуальним є застосування математичного та комп'ютерного моделювання нестационарних теплових процесів у медичних холодильних камерах з термоелектричними охолоджувачами.

Мета роботи сфокусована на розробці методу комп'ютерного моделювання нестационарних режимів роботи термоелектричної холодильної камери, в якій розміщений об'єкт з активним тепловиділенням, для дослідження часової залежності температури в камері та оцінки впливу умов теплообміну, параметрів радіаторів і конструкції термоелектричних модулів на ефективність процесу охолодження. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції медичних холодильних камер та підвищення їх енергетичної ефективності і температурної стабільності.

1. Модель термоелектричної холодильної камери та математичний опис нестационарного процесу її охолодження

Модель камери, в якій розміщується охолоджуваний об'єкт, показана на рис. 1. Джерелом холоду в камері 1 слугують термоелектричні модулі 2. В залежності від температури, до якої охолоджується об'єкт, його теплоємності та кількості тепла, яке він виділяє, можуть використовуватися один або декілька однокаскадних або багатокаскадних ТЕ модулів. Передача холоду від теплопоглинальної поверхні модулів в камеру здійснюється за допомогою радіатора 3 за рахунок природньої або вимушеної конвекції повітря в камері, яку забезпечує вентилятор 4. Холодильна камера теплоізолювана шаром ізоляційного матеріалу 5. Між основою радіатора 3 і модулями 2 зазвичай розміщується тепловирівнювальна металева вставка 6. Тепло від тепловиділяючих спаїв ТЕ модулів відводиться в навколишнє середовище за допомогою радіатора 7, який охолоджується обдувом вентилятором 8.

За умови пропускання електричного струму через термоелементи модулів камера і розташований в ній об'єкт починають охолоджуватися. Достатньо велика сумарна теплоємність камери, об'єкта, радіатора, вентилятора і металевої вставки призводять до суттєвої залежності температури в камері від часу. Для розрахунку часової залежності температури в камері та основних параметрів нестационарного процесу охолодження камери, а саме часу досягнення в камері заданої температури, споживаної для цього ТЕ модулями електричної енергії, тощо, скористаємося наступними припущеннями:

- сумарна теплоємність C_o охолоджуваного об'єкта, повітря в камері та її стінок зосереджена всередині камери, температура в якій T_1 ;
- теплоємність C_{rc} радіатора в холодильній камері зосереджена на межі між основою радіатора та металевою вставкою, а температура на цій межі T_2 ;
- теплоємність C_m металевої вставки зосереджена на межі між вставкою та теплопоглинальною поверхнею ТЕ модулів, температура на якій T_3 ;
- теплоємність C_{rh} зовнішнього радіатора зосереджена на межі між тепловиділяючою поверхнею модулів та основою цього радіатора, а температура на цій межі T_4 ;
- власною теплоємністю термоелектричних модулів можна знехтувати, оскільки вона значно менша за теплоємності охолоджуваного об'єкта, камери, радіаторів та металевої вставки, а отже, фактично не впливає на час охолодження камери.

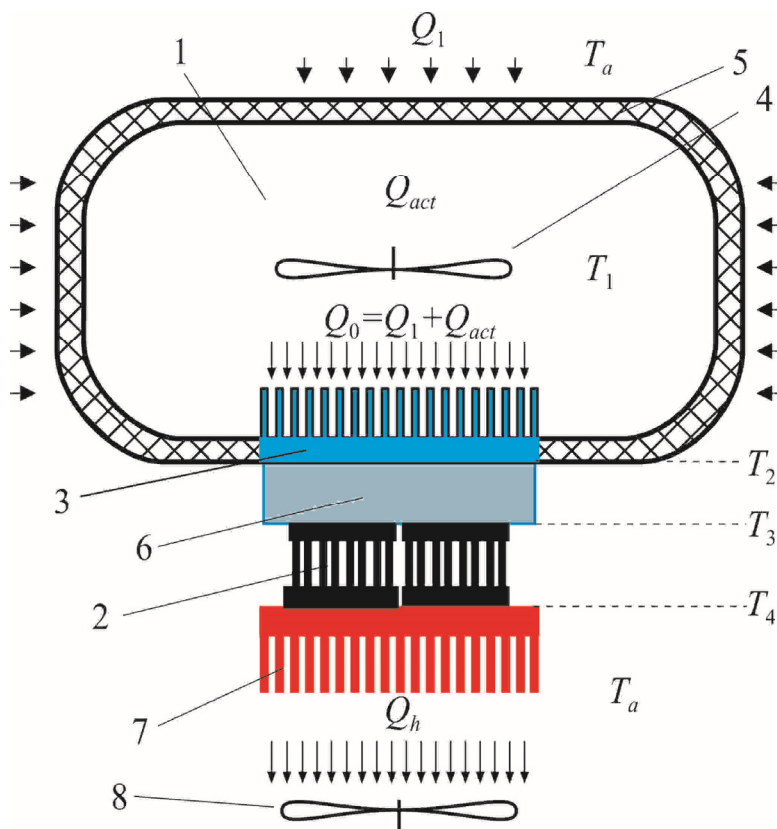


Рис. 1. Схема термоелектричної холодильної камери. 1 – холодинна камера; 2 – термоелектричні модулі; 3 – радіатор для передачі холоду в камеру; 4 – вентилятор в камері; 5 – тепла ізоляція камери; 6 – металева вставка; 7 – радіатор для відведення тепла від тепловиділяючих спайів ТЕ модулів в навколишнє середовище; 8 – вентилятор.

Температури T_1, \dots, T_4 змінюються з часом. За умови наведених припущень для розрахунку часової залежності цих температур використовується система квазістационарних рівнянь теплового балансу на межах між основними елементами моделі холодильника, яка записується у вигляді

$$\begin{aligned}
 C_o \frac{(T_1^{i+1} - T_1^i)}{\tau} &= \frac{1}{R_{rc}} (T_1^i - T_2^i) - Q_0 \\
 C_{rc} \frac{(T_2^{i+1} - T_2^i)}{\tau} &= \frac{\kappa_m s_m}{h_m} (T_2^i - T_3^i) - \frac{1}{R_{rc}} (T_1^i - T_2^i) \\
 C_m \frac{(T_3^{i+1} - T_3^i)}{\tau} &= Q_c(I, T_3^i, T_4^i) - \frac{\kappa_m s_m}{h_m} (T_2^i - T_3^i) \\
 C_{rh} \frac{(T_4^{i+1} - T_4^i)}{\tau} &= Q_h(I, T_3^i, T_4^i) - \frac{1}{R_{rh}} (T_4^i - T_a)
 \end{aligned} \tag{1}$$

де τ – крок по часу, а верхній індекс i позначає момент часу. Система (1) повинна задовольнятися в кожний момент часу $t_i = i\tau$. У цій системі $Q_0 = Q_1 + Q_{act}$ – теплова потужність, яку треба відводити з камери для її охолодження, Q_{act} – активне тепловиділення об'єкта в камері, $Q_1 = (\kappa_{in} s_{in} / h_m)(T_a - T_1)$ – потужність тепла, яке надходить в камеру через ізоляцію, R_{rc} та R_{rh} – теплові опори радіатора в камері та зовнішнього радіатора, відповідно, в умовах природньої або вимушеної конвекції, κ_{in} , s_{in} , h_m та κ_m , s_m , h_m – питома теплопровідність, площа та товщина ізоляційного матеріалу і металеві вставки, відповідно. $Q_c(I, T_3^i, T_4^i)$ – холодопродуктивність ТЕ модулів в i -ий момент часу, яка залежить від струму живлення модулів I і температур T_3^i, T_4^i , $Q_h(I, T_3^i, T_4^i) = Q_c(I, T_3^i, T_4^i) + W(I, T_3^i, T_4^i)$ – їх теплопродуктивність, $W(I, T_3^i, T_4^i)$ – споживана модулями потужність.

Для розв'язування квазістационарної системи (1) необхідні початкові умови, які мають вигляд

$$T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_a, \tag{2}$$

де T_a – температура оточуючого середовища. Також на кожному кроці по часу треба розраховувати холодопродуктивність Q_0 і електричну потужність W ТЕ модулів за умови заданої їх конструкції і струму їх живлення.

2. Метод розрахунку холодопродуктивності і потужності термоелектричних модулів

Метод розрахунку холодопродуктивності Q_c і електричної потужності W N -каскадних ТЕ модулів ґрунтується на розв'язуванні системи диференціальних рівнянь для знаходження розподілів температури $T(x)$ і питомого теплового потоку $q(x) = Q(x)/I$ у термоелектричних вітках n - і p -типу провідності, яка має вигляд [14]

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dT^{(k)}}{dx} &= -\frac{\alpha_j}{\kappa} T^{(k)} - \frac{j}{\kappa} q^{(k)}, \\
 \frac{dq^{(k)}}{dx} &= \frac{\alpha^2 j}{\kappa} T^{(k)} + \frac{\alpha j}{\kappa} q^{(k)} + \frac{j}{\sigma}
 \end{aligned} \right\} \begin{matrix} k = 1, \dots, N, \\ n, p \end{matrix} \tag{3}$$

де $x = x/L, 0 \leq x \leq 1$ – безрозмірна координата, $j = I L/s_0$ – питома густина струму, s_0 – площа поперечного перерізу термоелектричної вітки, L – її висота. У цих рівняннях коефіцієнти термоЕРС $\alpha_{n,p} = \alpha_{n,p}(T)$, електропровідності $\sigma_{n,p} = \sigma_{n,p}(T)$ та теплопровідності $\kappa_{n,p} = \kappa_{n,p}(T)$ матеріалів віток n - і p -типу провідності є функціями температури.

Крайові умови для цієї системи записуються наступним чином [14]:

$$\begin{aligned} T_n^{(k)}(0) = T_p^{(k)}(0) \equiv T_{(k)}(0), \quad T_n^{(k)}(1) = T_p^{(k)}(1) \equiv T_{(k)}(1), \quad k = 1, \dots, N, \\ T_{(1)}(0) = T_4, \quad T_{(N)}(1) = T_3, \quad T_{(k)}(0) = T_{(k-1)}(1) + \delta T, \quad k = 2, \dots, N, \\ q_1^{(k)} n_k = q_0^{(k-1)} n_{k-1}, \quad k = 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (4)$$

де δT є різницею температур, спричиненою термічним опором міжкаскадної ізоляційної пластини, яка в стандартних модулях не перевищує 0.5 К, n_k – кількість термопар в k -ому каскаді, $q_0^{(k)}, q_1^{(k)}$ – питомі потоки тепла через теплопоглинальні та тепловиділяючі спаї термоелементів k -ого каскаду, відповідно, які визначаються наступним чином

$$q_0^{(k)} = \sum_{n,p} \left[q^{(k)}(1) + j \frac{r_0}{L} \right]_{n,p}, \quad q_1^{(k)} = \sum_{n,p} \left[q^{(k)}(0) - j \frac{r_0}{L} \right]_{n,p}, \quad (5)$$

де r_0 – контактний опір [14, 15].

Застосовуючи розв'язок крайової задачі (3) – (4), обчислюють холодопродуктивність Q_c та споживану потужність W термоелектричних модулів за формулами:

$$Q_c = -m n_N q_0^{(N)} I, \quad W = -m I \sum_{k=1}^N n_k (q_1^{(k)} - q_0^{(k)}), \quad (6)$$

де m – кількість модулів, яка використовується для охолодження камери.

На основі квазістационарних рівнянь теплового балансу (1) з початковими умовами (2) та рівнянь крайової задачі (3) – (4) для обчислення характеристик термоелектричного модуля були розроблені алгоритм і комп'ютерна програма для дослідження часової поведінки температури в термоелектричній холодильній камері та параметрів, які характеризують ефективність її роботи.

Слід зауважити, що струмом I живлення термоелектричних модулів можна керувати, тобто змінювати його величину в окремі моменти часу або використовувати задані часові функції струму $I(t)$. Отже, розроблений алгоритм можна застосувати для дослідження характеристик довільних динамічних режимів охолодження камери.

3. Алгоритм і програма розрахунку характеристик холодильної камери

Для комп'ютерного моделювання нестационарних режимів роботи термоелектричної холодильної камери необхідно задати наступні дані: теплоємності

камери, об'єкта в камері, радіаторів і металевої вставки, теплові опори радіаторів, розміри камери і металевої вставки, товщину ізоляції камери, питому теплопровідність матеріалів ізоляції і металевої вставки, температуру оточуючого середовища, температуру, яку необхідно досягти в камері, теплову потужність активного тепловиділення об'єкта, який охолоджується в камері. Також задаються кількість ТЕ модулів, що застосовується для охолодження камери, параметри конструкції модуля, а саме кількість каскадів, кількість термопар в кожному каскад, висота і площа перерізу їх віток та струм живлення модулів за послідовного з'єднання термопар. Інтерфейс програми для вводу цих даних показаний на рис. 2.

The interface is divided into several sections:

- Basic parameters for calculation:**
 - Refrigerator basic parameters:** Environment temperature (298 K), Required chamber temperature (260 K).
 - Cooling chamber:** Volume (1000 cube cm), Chamber heat capacity (200.00 J/K), Chamber surface area (500.00 sq.cm), Chamber insulation thickness (1.00 cm), Chamber insulation heat conductivity (0.000348 W/cm K), Heat capacity of object to be cooled (0.00 J/K), Heat production in chamber (0.00 W).
 - Thermoelectric cooler:** Number of stages (2), Thermoelectric branch length (0.14 cm), Branch cross section area (0.036 sq. cm), TEC current (6.0 A), Number of modules (1), TEC area (16.00 sq. cm).
- Thermoelectric material parameters:** Temperature range between 200.00 K and 300.00 K.
- Parameters for air heat exchange:**
 - Cooling Chamber Case:** S1 500.00 sq.cm, h1 1.00 cm, k1 0.000348 W/cm K.
 - Metal plate:** hAl 3.00 cm, KAl 2.00 W/cm K, cAl 0.880 J/g K, dAl 2.70 g/cm³.
 - Hot radiator:** Rh 0.500 K/W, ah 1000.00 W/sq.cm K, Sh 36.00 sq.cm, Cth 61.10 J/K.
 - Cooling chamber radiator:** ac 1000.0 W/sq.cm K, Rc 0.200 K/W, Sc 25.00 sq.cm, Crc 42.00 J/K.
 - Number of pair:** 1st stage 96, 2nd stage 45.

A central diagram shows a schematic of the cooling chamber with a TEC module and radiators. The environment temperature is T_a = 298.00 K. The chamber temperature is T₁. The heat production in the chamber is Q_{act}. The TEC is labeled as TEC: 2 stages.

Рис. 2. Інтерфейс програми для вводу даних для розрахунку термоелектричної холодильної камери.

Температурні залежності параметрів $\alpha_{n,p}(T)$, $\sigma_{n,p}(T)$ та $\kappa_{n,p}(T)$ термоелектричних матеріалів n- і p-типу провідності задані в програмі у вигляді поліномів, якими апроксимуються ці характеристики для матеріалів на основі Bi₂Тез. Інтерфейс програми (рис. 3) дозволяє коригувати поліноми за потреби.

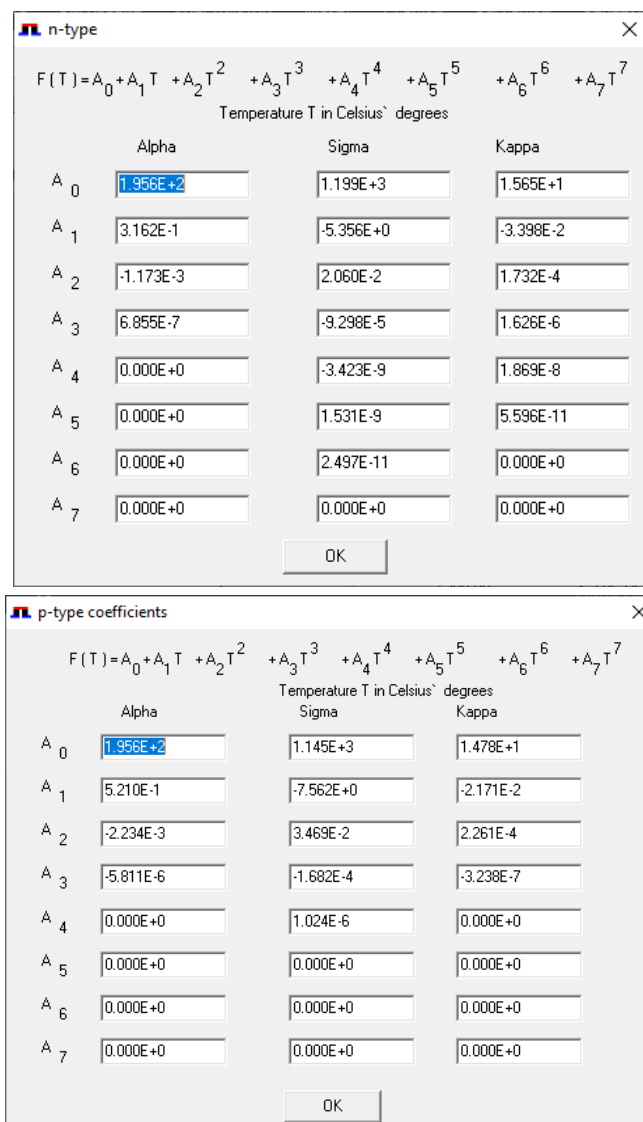


Рис. 3. Інтерфейс програми для коригування характеристик термоелектричних матеріалів

Для розрахунку часової залежності температури в камері застосовується наступний алгоритм послідовних наближень.

1. Використовуючи початкові значення температур T_3 і T_4 (2) для крайових умов (4), спочатку методами кінцевих елементів та ітерацій Ньютона розв'язується нелінійна крайова задача (3)–(4). За формулами (5) і (6) розраховуються значення холодопродуктивності $Q_c^{(1)}$ та потужності $W^{(1)}$ на першому кроці по часу.

2. Застосовуючи систему рівнянь (1) теплового балансу, розраховуємо температури $T_1^{(1)}, T_2^{(1)}, T_3^{(1)}, T_4^{(1)}$ на першому кроці по часу.

3. Повторюємо пункти 1–2 і знаходимо значення $Q_c^{(i)}, W^{(i)}, T_1^{(i)}, T_2^{(i)}, T_3^{(i)}, T_4^{(i)}$ послідовно на кожному кроці i по часу.

4. Виконуємо обчислення за пунктами 1–3, доки температура $T_1^{(i_f)}$ в деякий кінцевий момент часу i_f не досягне значення, близького за заданої точності до холодної температури, яку необхідно досягти в камері.

5. Обраховуємо час охолодження камери $t_f = i_f \tau$ і споживану ТЕ модулями за цей час електричну енергію $E_f = \tau \sum_{i=1}^{i_f} W^{(i)}$.

Зауважимо, що збіжність такого алгоритму послідовних наближень забезпечується малим значенням кроку τ по часу.

Результатами розрахунку за програмою є часові залежності температури в камері $T_1(t)$, температури основи радіатора в камері $T_2(t)$, температури теплопоглинальної $T_3(t)$ та тепловиділяючої $T_4(t)$ поверхонь ТЕ модулів, а також час охолодження камери, значення температур T_1, T_2, T_3, T_4 в кінцевий момент часу та споживана ТЕ модулями електрична енергія.

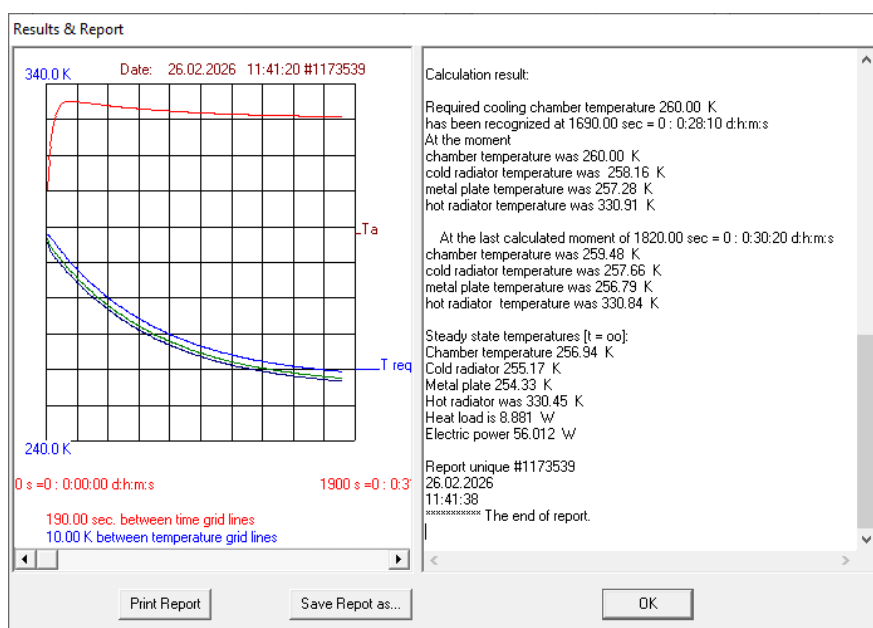


Рис. 4. Інтерфейс програми для виводу результатів розрахунку характеристик термоелектричної холодильної камери

Інтерфейс програми для виводу результатів показаний на рис. 4. Як приклад, на рис. 4 наведені результати отримані для камери об'ємом 1 літр, яка охолоджується двокаскадним ТЕ модулем. Конструкція модуля та інші вихідні дані для цих результатів вказані на рис. 2, 3. В цьому прикладі камера охолоджується від 298 К до температури 260 К за 28 хвилин.

Висновки

Розроблена модель ТЕ холодильної камери враховує тепловий опір та термоємність всіх основних елементів її конструкції, що забезпечує наближеність моделювання процесу охолодження камери до реальних умов її експлуатації.

Розв'язування квазістационарних рівнянь теплового балансу на межах між основними елементами моделі холодильника у сукупності з розв'язуванням стаціонарної крайової задачі для знаходження розподілу температури і теплового потоку в термоелектричних вітках

уможливило розробку алгоритму і комп'ютерного засобу для моделювання нестационарних режимів роботи ТЕ холодильної камери.

Реалізований комп'ютерний засіб дозволяє здійснювати візуалізацію часової зміни температури в камері та аналізувати вплив параметрів конструкції термоелектричних модулів і режиму їх роботи на ефективність процесу охолодження. Отримані результати можуть використовуватися для вдосконалення існуючих і розробки нових конструкцій ТЕ модулів [16, 17] та оптимізації режимів їх роботи з метою підвищення енергоефективності охолодження камери і забезпечення її температурної стабільності.

Інформація про авторів

Вихор Л.М. – Доктор фіз.-мат. наук.

Коцур М.П. – Кандидат фіз.-мат. наук.

Хриков В.К. – Аспірант.

Черкез Р.Г. – Доктор фіз.-мат. наук, професор.

Література

1. Zaferani S.H., Sams M.W., Ghomashchi R., Chen Z.-G. (2021). Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical applications: design, optimization, and advancement. *Nano Energy* 90, 106572. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106572>
2. Güler N.F., Ahiska R. (2002). Design and testing of a microprocessor-controlled portable thermoelectric medical cooling kit. *Appl. Therm. Eng.* 22 (11), 1271–1276. [https://doi.org/10.1016/s1359-4311\(02\)00039-x](https://doi.org/10.1016/s1359-4311(02)00039-x)
3. Putra N. (2009). Design, manufacturing and testing of a portable vaccine carrier box employing thermoelectric module and heat pipe. *Journal of Medical Engineering & Technology* 33 (3), 232–237. <https://doi.org/10.1080/03091900802454517>
4. Ohara B., Sitar R., Soares J., Novisoff P., Nunez-Perez A., Lee H. (2015). Optimization Strategies for a Portable Thermoelectric Vaccine Refrigeration System in Developing Communities. *Journal of Electronic Materials* 44 (6), 1614–1626. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3491-9>
5. Lin Y.-T., Permana I., Wang F., Chang R.-J. (2024). Improvement of heating and cooling performance for thermoelectric devices in medical storage application., *Case Studies in Thermal Engineering* 54, 104017. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104017>
6. Khan Y., Khan T.A., Ilyas M., Ali M.T., Ahmed S. (2024). Experimental investigation of Peltier based thermoelectric cooling system for vaccine storage. *Journal of Computing & Biomedical Informatics* 6 (2), 139–147. <https://doi.org/10.56979/602/2024>
7. Pinar Mert Cuce (2024). Design and experimental investigation of a thermoelectric vaccine cabinet integrated with photovoltaic and nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 149, 9955–9965. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13433-9>
8. Kobylianskyi R., Zadorozhnyi O., Umanets M., Pasechnikova N., Rozver Y., & Babich A. (2024). Computer simulation of a thermoelectric device for controlling the temperature of

- irrigation fluid during ophthalmological operations. *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 61–71. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-1-2-61-71>
9. Awaludin M., Ridho F., Tri B.L. (2022). Development of portable blood carrier box employing thermoelectric module by using oil palm empty fruit bunch composites as materials of box. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 93 (2), 50–60. <https://doi.org/10.37934/arfmts.93.2.5060>
 10. Kobylianskyi R., Vikhor L., Fedoriv R., Izvak Y. (2024). Design of a multi-stage thermoelectric cooler for a human heart ablation device. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 5–13. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-4-5-13>
 11. Anatyshuk L., Kobylianskyi R., & Lysko V. (2023). Computer design of a thermoelectric pulmonary air condenser with thermostating of collected condensate. *Journal of Thermoelectricity*, (2), 87–96. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2023-2-87-96>
 12. Kobylianskyi R., Lysko V., Pasychnikova N., Umanets M., Zadorozhnyy O., Rozver Y., & Babich A. (2025). Application of thermoelectric cooling and heating to control the temperature of irrigation fluid in ophthalmic surgery. *Physics and Chemistry of Solid State*, 26 (1), 151–157. <https://doi.org/10.15330/pcss.26.1.151-157>
 13. Luo D., Zhang H., Yi Qiu, ..., Wang, G. (2026). Revealing dynamic characteristics of the two-stage thermoelectric cooler under double-pulse excitation. *International Journal of Refrigeration* 183, 278–286. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2026.01.016>
 14. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Kobylianskyi R.R., Kadaniuk T.Y. (2017). Computer simulation and optimization of the dynamic operating modes of thermoelectric device for treatment of skin diseases. *Journal of Thermoelectricity*, (2), 46–59.
 15. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Kobylianskyi R.R., Kadaniuk T.Y., Zvarych O.V. (2017). Computer simulation and optimization of the dynamic operating modes of thermoelectric reflexotherapy device. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 65–74.
 16. Vikhor L. (2024). Modeling of thermoelectric converter characteristics: Lecture at the Summer Thermoelectric School, June 30, 2024, Krakow, Poland. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 5–22. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-3-5-22>

L.M. Vikhor¹ (<https://orcid.org/0000-0002-8065-0526>),
M.P. Kotsur² (<https://orcid.org/0000-0002-4072-3524>),
V.K. Khrykov² (<https://orcid.org/0009-0001-5093-3859>),
R.G. Cherkez^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0002-7218-6815>)

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,

2 Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

Computer Simulation of the Non-Stationary Operating Mode of Thermoelectric Cooling Chamber for Medical Purposes

The paper proposes a model of a thermoelectric cooling chamber for medical purposes, which takes into account the thermal resistance and heat capacity of all the main elements of its design, ensuring that the simulation of the chamber cooling process is close to the actual conditions of its operation. A mathematical method of simulating the characteristics of the non-stationary cooling process of such a chamber is described, based on the solution of quasi-stationary heat balance equations at the boundaries between the main elements of the refrigerator model in combination with the solution of a stationary boundary value problem for finding the distribution of temperature and heat flow in thermoelectric legs. An algorithm and a computer tool have been developed to calculate the characteristics and parameters of the chamber cooling in the non-stationary mode of its operation. The computer program allows analyzing the influence of the design of thermoelectric modules and their power supply mode on the efficiency of the chamber cooling process, and using the obtained results to improve the design of TE modules and optimize their operating modes.

Keywords: thermoelectric cooling chamber, non-stationary mode, computer simulation, thermoelectric module.