

УДК 621.565:536.48:004.94

## МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОХОЛОДИЛЬНИКІВ З ЕФЕКТОМ ДЖОУЛЯ–ТОМСОНА

Круковський П.Г.<sup>1</sup>, Ткач В. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>докт. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, зав. лабораторії моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях ІТТФ НАНУ, професор, [orcid.org/0000-0001-6726-0550](https://orcid.org/0000-0001-6726-0550), e-mail: [kruk\\_2@ukr.net](mailto:kruk_2@ukr.net)

<sup>2</sup>аспірант, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, молодший науковий співробітник лабораторії моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях ІТТФ НАНУ, [orcid.org/0009-0002-1949-4496](https://orcid.org/0009-0002-1949-4496), e-mail: [tkachtkach1@gmail.com](mailto:tkachtkach1@gmail.com)

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.5>

Розглянуто принцип роботи, конструкцію та існуючу математичну модель мікрохолодильників (МКХ) з ефектом Джоуля-Томсона для охолодження мікроелектроніки і інфрачервоних датчиків. Принцип роботи ефекту Джоуля-Томсона полягає в адиабатному охолодженні потоку газу при різкому розширенні після проходження через дросель. Організація протиточного теплообміну між прямим стислим потоком газу до дроселя і охолодженням розширеним після дроселя може досягати криогенних температур. Останні десятиріччя були присвячені вибору конструкції таких МКХ, а також розвитку математичних моделей і комп'ютерних програм з метою вибору оптимальних параметрів цих конструкцій. В роботі на прикладі мініатюрного мікрохолодильника зі спіральною капілярною трубкою з ребрами, соплом, оправою та сосудом Дьюара розглядається існуюча двовимірною модель термодинамічного стану мікрохолодильників з робочим газом азот і пропонується більш точна тривимірною математична і комп'ютерна моделі, що і є новизною роботи.

The principle of operation, design and existing mathematical model of microrefrigerators (MCRs) with the Joule-Thomson effect for cooling microelectronics and infrared sensors are considered. The principle of operation of the Joule-Thomson effect is the adiabatic cooling of the gas flow during its sharp expansion after passing through the throttle. The organization of countercurrent heat exchange between the direct compressed gas flow to the throttle and the cooled expanded gas flow after the throttle can reach cryogenic temperatures. The last decades have been devoted to the choice of the design of such heat exchangers and the development of mathematical models and computer programs in order to select the optimal parameters of these structures. In the work, using the example of a miniature microrefrigerator with a spiral capillary tube with ribs, a nozzle, a frame, and a Dewar vessel, the existing two-dimensional model of the thermogasodynamic state of microrefrigerators with nitrogen as the working gas is considered and a more accurate three-dimensional mathematical and computer model is proposed, which is the novelty of the work.

Бібл. 6, рис. 3, табл. 1.

**Ключові слова:** мікрохолодильники, ефект Джоуля-Томсона, моделювання.**Вступ**

Мікрохолодильники (МКХ) з ефектом Джоуля-Томсона призначені для швидкого охолодження компонентів та речовин у стиснених умовах. Ці пристрої мають циліндричні форми і малі розміри (3-15 мм в діаметрі і 3-10 см довжиною), вагою до 20 грам, короткий час заохолодження (до 10 секунд) і високу стабільність роботи протягом тривалого часу [1]. Часто їх використовують для охолодження мікроелектроніки, в медицині, а також в космічній і оборонній техніці. Особливо важливу роль вони відіграють для охолодження до криогенних температур інфрачервоних датчиків розмірами до 10 мм з тепловиділенням до 1,5 Вт.

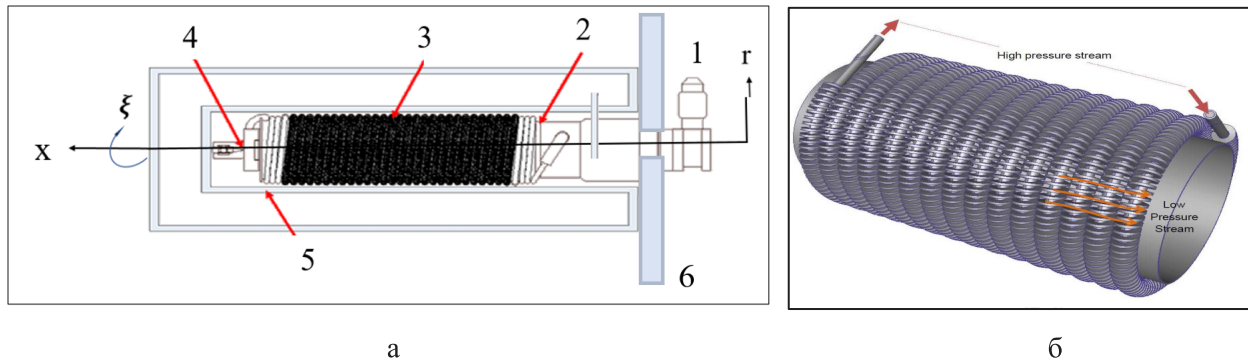
**Принцип роботи та конструкція мікрохолодильника**

Принцип роботи ефекту Джоуля-Томсона полягає в адиабатному охолодженні потоку газу при різкому розширенні після проходження через дросель. Організація протиточного теплообміну між прямим

стислим потоком газу до дроселя і зворотним охолодженням і розширеним після дроселя може досягати криогенних температур [1]. Принципова схема такого мікрохолодильника з сосудом Дьюара показана на рис.1,а, де через штуцер 1 газ високого тиску подається в спірально намотану на оправу 2 оребрену капілярну трубку 3, яка є основною частиною теплообмінника, більш детально показаного на рис.1,б [2]. На прикладі азоту, (як робочого газу високого тиску від 10 до 40 МПа) при кімнатній температурі потік проходить через дросель 4, розширюється (до 0,5 атм), охолоджується (потенційно до 60 К) і повертається через зовнішню поверхню оребреної поверхні теплообмінника в зворотному напрямку і виходить назовні. При цьому він охолоджує прямий потік високого тиску, який проходить через середню частину капілярної трубки і внутрішню частину стінки сосуда Дьюара 5.

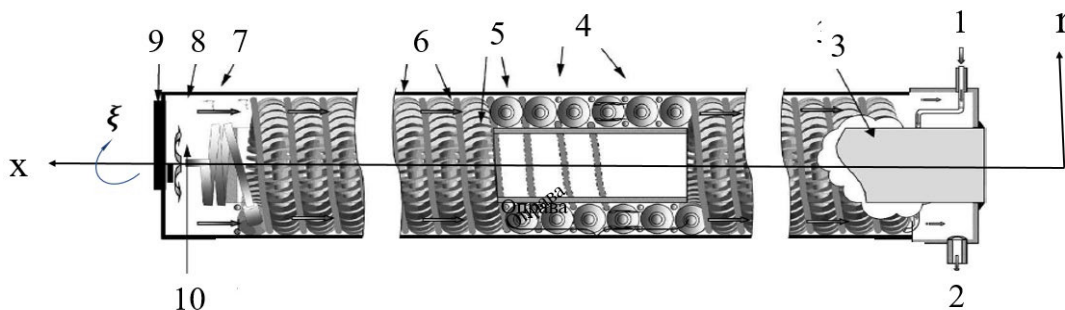
Більш детальна схема мікрохолодильника наведена на рис. 2. [3] Робочий газ високого тиску надходить через штуцер подачі газу високого тиску 1 в ребристий капіляр, і далі тече спірально всередині цього ребреного капіляра на оправі 5. На виході з капіляра потік розширюється ізоентальпійно через отвір до нижчого тиску. Зниження тиску при постійній ентальпії призводить до зниження температури. Газ після ізоентальпійного розширення через сопло 10 між газом високого і низького тиску. Газ низького

тиску та низької температури потрапляє в теплообмінник через кільцевий отвір між оправкою та внутрішньою частиною стінки сосуда Дьюара (тут не показаний). Потік газу низького тиску тече у зустрічному/поперечному напрямку з потоком з боку труби, навколо ребристого капіляра, між ребрами та охолоджує потік з боку труби. Вихід потоку низького тиску відводиться через штуцер 2. Найбільш холодною є порожнина 8 розширення потоку після сопла 10, де і розташовані датчик або електронна схема 9



**Рис. 1.** Принципова схема мікрохолодильника з сосудом Дьюара (а) і циліндричною оправою з спірально намотаною ребреною капілярною трубкою (б). На рис. а: 1 – штуцер для подачі газу високого тиску, 2 – оправка холодильника, 3 – ребрена капілярна трубка; 4 – сопло, 5 – стінки сосуда Дьюара, 6 – кріплення мікрохолодильника з сосудом Дьюара [2]

**Figure 1.** Schematic diagram of a microrefrigerator with a Dewar vessel (a) and a cylindrical frame with a spirally wound finned capillary tube, mounting a microrefrigerator with a Dewar vessel (b). In Fig. a: 1 – high-pressure gas supply fitting, 2 – refrigerator frame, 3 – finned capillary tube; 4 – nozzle, 5 – Dewar vessel walls, 6 – mounting a microrefrigerator with a Dewar vessel [2]



**Рис. 2.** Детальна схема мікрохолодильника. 1 – штуцер подачі газу високого тиску, 2 – штуцер відводу потоку низького тиску, 3 – оправка, 4 – локальний розріз холодильника, 5 – спіральна котушка з ребреною капілярною трубкою на оправі, 6 – ребра спіральної котушки, 7 – зворотній напрямок потоку газу низького тиску, 8 – порожнина розширення потоку після сопла, 9 – датчик або електронна схема, 10 – сопло між газом високого і низького тиску

**Figure 2.** Detailed diagram of a microrefrigerator. 1 - high-pressure gas supply fitting, 2 - low-pressure flow outlet fitting, 3 - frame, 4 - local section of the refrigerator, 5 - spiral coil with finned capillary tube on the frame, 6 - fins of the spiral coil, 7 - reverse direction of low-pressure gas flow, 8 - flow expansion cavity after the nozzle, 9 - sensor or electronic circuit, 10 - nozzle between high and low pressure gas

Середні розміри загальних і окремих частин мікрохолодильників наведено в табл.1, що показує наскільки вони мініатюрні.

Характеристика холодопродуктивності таких МКХ є теж мала і лежить в діапазоні 1-4 вата і залежить від рівня тиску на вході в МКХ, а швидкість його охолодження (самоохолодження), сягає декілька секунд. Робоча температура МКХ залежить від типу робочого тіла, наприклад, азот для досягнення рівня  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для забезпечення мінімальних витрат робочого тіла в МКХ існує дросельний мікроклапан, який саморегулюється в залежності від температури робочого тіла за соплом.

Останні десятиріччя були присвячені вибору наведених вище конструкції МКХ, а також розвитку математичних моделей і комп'ютерних програм з метою вибору оптимальних параметрів цих конструкцій. Моделювання різноманітних конструкцій МКХ стало важливим інструментом дослідження і оптимізації параметрів термогазодинамічного стану МКХ, враховуючи середні розміри і окремі частин МКХ (див. табл. 1), в той час як експериментальні дослідження є набагато складнішими.

Виходячи з назви цієї роботи на прикладі мініатюрного мікрохолодильника зі спіральною капілярною трубкою з ребрами, соплом, оправою та сосудом Дьюара нижче серед низки моделей [1-4] розглядається існуюча типова двовимірною модель термогазодинамічного стану МКХ з Дьюаром [4], яка не враховує градієнти температур в радіальному напрямку  $r$  (рис.1 і 2), **що є певною проблемою** при моделюванні.

**Метою роботи** є доповнення існуючої двовимірної математичної моделі до рівня більш точної тривимірної моделі для твердих деталей МКХ, а також застосування

Таблиця 1. Середні розміри загальних і окремих частин МКХ [2]

Table 1. Average sizes of common and individual parts of the MCC[2]

<i>Геометричний параметр</i>	<i>Розмір, мм</i>
Діаметр одного витка по осі капіляра	4,07
Внутрішній діаметр капіляра	0,3
Зовнішній діаметр капіляра	0,5
Крок намотки труби	0,95
Кількість витків	42
Висота оребрення	0,2
Крок оребрення	0,132
Товщина оребрення	0,08
<b>Загальний діаметр мікрохолодильника</b>	<b>5,0</b>
<b>Загальна довжина мікрохолодильника</b>	<b>52,0</b>
Кількість ребер на один оберт капіляра	55 шт.

сучасних комп'ютерних технологій реалізації моделей, що є **новизною роботи**.

#### **Розрахункові моделі мікрохолодильників**

Сучасне розрахункове моделювання будь-яких об'єктів складається з наступних 4-х етапів: розробка **геометричної, фізичної, математичної і комп'ютерної** моделей.

**Геометрична** типова модель мініатюрного мікрохолодильника, розміщеного в сосуді Дьюара, показана в системі координат  $X, r$  і  $\xi$  на рис.1,а і 2. В моделі дрібна геометрія діаметра капілярної трубки і ребра на ній представляється як тонкі коаксіальні щілини, по середній із яких тече газ високого тиску, а по щілинам зверху і низу його в зворотному напрямку тече газ низького тиску. Геометрія сопла, датчика або електронна схема враховуються теж.

**Фізична** модель мініатюрного мікрохолодильника, розміщеного в сосуді Дьюара словами описує усі термогазодинамічні процеси як всередині приладу, що розглядається, так і взаємодії цих процесів з оточуючим середовищем як в стаціонарному, так і не стаціонарному режимі. Тут важливо правильно задати значення всіх фізичних параметрів всередині приладу, так і на його поверхнях.

**Математична** модель по суті описує фізичну модель диференціальними і алгебраїчними математичними рівняннями, які потенційно дозволяють кількісно розраховувати параметри термогазодинамічних процесів приладу. Рівняння цих моделей розраховують аналітичними і чисельними методами. Математична модель (1) - (11) мікрохолодильника з сосудом Дьюара розглядається нижче.

**Комп'ютерна** модель по суті реалізує математичну модель фізичних процесів, а саме, в зручному вигляді кількісно приймає вихідні дані для розрахунків і видає результати розрахунків параметрів термогазодинамічних процесів приладу. Наразі існує низка потужних і готових комп'ютерних програм (середовищ) [5-6], які дозволяють реалізовувати широкий спектр фізичних і математичних моделей, в тому числі мікрохолодильники з сосудом Дьюара для охолодження мікросхем і датчиків.

**Типова математична модель мікрохолодильників**

Нижче наведена типова нестационарна математична модель МКХ [4], що описує всі фізичні процеси, що протікають в мініатюрному мікрохолодильнику, розміщеному в сосуді Дьюара, але не враховує тепловий стан важливих частин кріплення Дьюара і датчика, що суттєво впливає на температуру цього датчика.

**Газ високого тиску**

Рівняння нерозривності (1), імпульсу (2) та енергії (3) для газу високого тиску, що тече вздовж спірального напрямку оребреної трубки,  $\xi$  (рис.1), записано так

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial \xi} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial \xi} = -\frac{\partial P}{\partial \xi} + \frac{2f\rho u^2}{d_h}, \tag{2}$$

$$\rho A_l \left[ C_p \frac{\partial T_h}{\partial \tau} + u \frac{\partial C_p T_h}{\partial \xi} + \frac{\partial (u^2/2)}{\partial \xi} \right] = -h_l(\pi d_l)(T_h - T_i), \tag{3}$$

де  $\tau$ -час,  $m$  – масова витрата;  $\rho$  – густина;  $u$  – швидкість газу;  $P$  – тиск газу;  $f$  – коефіцієнт тертя потоку газу;  $d$  – внутрішній діаметр каналу;  $A$  – площа поперечного перерізу потоку газу;  $C_p$  – питома теплоємність газу;  $T$  – температура;  $h$  – коефіцієнт тепловіддачі, а нижні індекси  $h$  та  $i$  позначають газ високого тиску та поверхню трубки,.

Коефіцієнт тертя газу та тепловіддачі для газу високого тиску розраховується за емпіричним рівнянням.

**Газ низького тиску**

Рівняння нерозривності (4), імпульсу (5) та енергії (6) для газу низького тиску вздовж поздовжнього напрямку холодильника  $x$  записано так

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = 0, \tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{2f\rho u^2}{d_l}, \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \rho A_l \left[ C_p \frac{\partial T_l}{\partial \tau} + u \frac{\partial C_p T_l}{\partial x} + \frac{\partial (u^2/2)}{\partial x} \right] = \\ = -h_l A_{p,l}(T_l - T_i) - h_f A_{p,f}(T_l - T_f), \end{aligned} \tag{6}$$

де  $A_p$  позначає кільцеву площу потоку;  $d_l$  – гідравлічний діаметр проходу; а нижні індекси  $l, f, m$  та  $d$  позначають газ низького тиску, ребро, оправу та сосуд Дьюара відповідно. Коефіцієнт тертя газу низького тиску розраховується за емпіричним рівнянням [8], а коефіцієнт тепловіддачі – за емпіричним рівнянням для ряду труб.

**Спіральна трубка і ребра**

Енергетичне рівняння для одношарової спіральної трубки та ребра вздовж спірального напрямку можна записати так

$$\begin{aligned} m_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial \tau} = k_t A_t \frac{\partial^2 T_t}{\partial \xi^2} + h_n A_{p,ti}(T_h - T_i) + \\ + h_l A_{p,to}(T_l - T_t) + 2 \frac{k_t k_f}{k_f W_f + k_t t_t} W_f L_f (T_t - T_f) \end{aligned} \tag{7}$$

де  $m$  – маса;  $k$  – теплопровідність;  $W$  – ширина ребра;  $t$  – товщина ребра;  $L$  – довжина ребра; а нижній індекс  $ti$  позначає внутрішню та зовнішню сторони.

**Оправа**

Оправка охолоджується газом низького тиску вздовж зовнішньої поверхні, а внутрішня поверхня вважається адіабатичною. Тому рівняння енергії (8) вздовж осьового напрямку записується так

$$m_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = k_m A_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + h_l A_{p,m}(T_l - T_m), \tag{8}$$

$$m_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = k_m A_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + A_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + h_l A_{p,m}(T_l - T_m), \tag{8a}$$

**Сосуд Дьюара**

Сосуд Дьюара знизу охолоджується газом низького тиску вздовж внутрішньої поверхні, а зовнішня поверхня має конвективний і радіаційний теплообмін, що визначається за формулою (9)

$$\begin{aligned} m_d C_d \frac{\partial T_d}{\partial \tau} = k_d A_d \frac{\partial^2 T_d}{\partial x^2} + h_l A_{p,d}(T_l - T_d) + \\ + h_r(\pi d_{do})(T_d^4 - T_{amb}^4), \end{aligned} \tag{9}$$

$$m_d C_d \frac{\partial T_d}{\partial \tau} = k_d A_d \frac{\partial^2 T_d}{\partial x^2} + A_d \frac{\partial^2 T_d}{\partial r^2} + h_l h_l A_{p,d} (T_l - T_d) + h_r (\pi d_{do}) (T_d^4 - T_{amb}^4), \quad (9a)$$

де  $h_r$  – коефіцієнт радіаційного теплообміну;  $a$  - нижній індекс,  $amb$  – температура навколишнього середовища.

**Сопло**

Масова витрата  $m$  без зміни ентальпії  $H$  через сопло записується як

$$\dot{m} = C_d \sqrt{\gamma P_{nz} \rho_{nz} A_{nz} \left[ \frac{2}{\gamma} + 1 \right]^{\frac{(\gamma+1)0,5}{\gamma-1}}}, \quad H_{out} = H_{in}, \quad (10)$$

де  $C_d$  – коефіцієнт протікання сопла;  $\gamma$  – теплоємність газу;  $H$  – ентальпія;  $a$  нижній індекс  $nz$  позначає сопло.

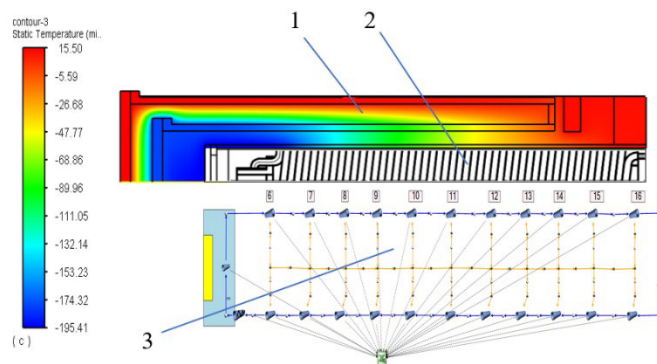
Термодинамічні властивості робочого тіла газу (наприклад азоту) знаходяться окремо із чисельних джерел.

Таким чином аналіз моделі (1)-(10) показує, що автори не враховують тепловий стан важливих масивних частин приладу, а саме штуцер подачі газу високого тиску і кріплення Дьюара з мікрохолодильником (рис.1,а, позиції 1 і 6) а також найбільш холодного лівого подвійного торця Дьюара з датчиком (рис.1,а і 2), що суттєво впливає на температуру датчика, самого МКХ і його холодовиробництво. В цих місцях градієнти температур і теплові потоки значні і направлені вздовж осі  $r$  (рис. 1 і 2), але вони не враховуються в моделі (1)-(10), яка по суті є двовимірною (тільки осі  $X$  і  $\xi$ )

і це її недолік. Автори цієї роботи доповнили існуючу двовимірну модель до рівня більш точної тривимірної моделі шляхом заміни рівнянь (8) і (9) на рівняння (8,а) і (9,а), в яких другі додатки на темному фоні вже враховують всі градієнти температур і теплові потоки. Доречі, рівень теплових притоків через штуцер і кріплення Дьюара в сам Дьюар і МКХ складає більше 50% від загального холодовиробництва МКХ. Кількісні розподіли температур, теплових потоків і холодовиробництва МКХ в приладі типу рис.1 і 2 автори планують досліджувати надалі.

Розглянуті математичні моделі фізичних процесів не використовують сучасні комп'ютерні технології для моделювання термогазодинамічних процесів. Наразі існує низка потужних і готових комп'ютерних програм (середовищ) [5-6], які дозволяють реалізовувати широкий спектр фізичних і математичних моделей, в тому числі мікрохолодильники з сосудом Дьюара для охолодження мікросхем і датчиків. Серед таких технологій є так звана польова CFD технологія, в рамках якої об'єкт розбивається на велику кількість розрахункових комірок і одержує детальний розподіл величин фізичних процесів (рис. 3, поз. 1). Є також так звана вузлова технологія, в рамках якої в об'єкті виділяється певна кількість розрахункових вузлів, в яких розраховуються значення фізичних величин процесів (рис. 3, поз. 3).

CFD технологія дозволяє аналізувати детальний розподіл величин фізичних процесів окремо взятих об'єктів, в той час як вузлова технологія дозволяє одночасно аналізувати фізичні процеси довільної кількості об'єктів. Обидві технології можливо об'єднувати між



**Рис. 3. Комп'ютерна модель мікрохолодильника з сосудом Дьюара: 1 – сосуд Дьюара виконаний в рамках CFD технології в комп'ютерному середовищі ANSYS CFD, 2 – рисунок мікрохолодильника, 3 – комп'ютерна модель мікрохолодильника, виконана в рамках вузлової технології в середовищі FLOWNEX SE**

**Figure 3.– Computer model of a microrefrigerator with a Dewar vessel: 1 - Dewar vessel made within the framework of CFD technology in the ANSYS CFD computer environment, 2 - drawing of a microrefrigerator, 3 - computer model of a microrefrigerator made within the framework of nodal technology in the FLOWNEX SE environment**

собою для створення так званих гібридних моделей, яка також показана на рис. 3, де модель сосуда Дьюара виконаний в рамках CFD технології (рис. 3, поз. 1), а модель МКХ виконана в рамках вузлової технології (рис. 3, поз. 3), що дозволяє врахувати всі особливості МКХ з сосудом Дьюара. Це буде теж показано в подальших роботах авторів.

#### Висновки

1. Розглянуто принцип роботи і конструкцію мікрохолодильників (МКХ) з ефектом Джоуля-Томсона для охолодження мікроелектроніки і інфрачервоних датчиків. Виходячи із мініатюрних розмірів самого МКХ (3-15 мм в діаметрі і 3-10 см довжиною) і окремих частин (долі мм) теплообмінника формулюється висновок, що сучасне моделювання є важливим інструментом детального аналізу термогазодинамічного стану МКХ з сосудом Дьюара і оптимізації їх параметрів.

2. Розглядається існуюча двовимірною модель термогазодинамічного стану МКХ з сосудом Дьюара, яка не враховує тепловий стан штуцера подачі газу і кріплення Дьюара з мікрохолодильником і подвійного торця Дьюара, що суттєво впливає на температуру датчика, самого МКХ і його холодовиробництво.

3. Пропонується більш точна тривимірною математична і комп'ютерна модель, що дозволяє врахувати тепловий стан перерахованих вище частин приладу.

4. Розглянуті комп'ютерні технології і комп'ютерні програми (середовищ), які дозволяють реалізовувати фізичні і математичні моделі для аналізу і оптимізації параметрів МКХ з сосудом Дьюара для охолодження мікросхем і датчиків.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Maytal, B.-Z., Pfothner, J. M.* Miniature Joule-Thomson Cryocooling Principles and Practice. New York: Springer Science+Business Media, 2013, 380 p. (International Cryogenics Monograph Series).
2. *Hong, Y. J. et al.* Transactions of the cryogenic engineering conference—cec: Advances in Cryogenic Engineering. Tucson (Arizona), 2010. Available: <https://doi.org/10.1063/1.3422265>.
3. *Chua, H. T., Wang, X., Teo, H. Y.* A numerical study of the Hampson-type miniature Joule–Thomson cryocooler. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, Vol. 49, pp. 582–593.
4. *Hong, Y.-J., Park, S.-J., Choi, Y.-D.* A Numerical Study of the Performance of a Heat Exchanger for a Miniature Joule-Thomson Refrigerator. International Cryocoolers Conference Inc., Boulder, CO, 2010, pp. 379–386.
5. *ANSYS FLUENT 14.0.* Documentation. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node1.htm> (accessed 15.07.2025).
6. *Flownex SE 2021.* Documentation. Available: <https://flownex.com/resources/> (accessed 21.03.2025).

## MODELING OF MICRO REFRIGERATORS WITH THE JOULE–THOMSON EFFECT

P.G. Krukovsky<sup>1</sup>, V.M. Tkach<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Dr. Sci. (Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine), Head of heat and mass transfer modeling laboratory for energy objects and thermal technologies IETP NASU, Professor, orcid.org/0000-0001-6726-0550, e-mail: kruk\_2@ukr.net*

<sup>2</sup>*Postgraduate, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of heat and mass transfer modeling laboratory for energy objects and thermal technologies IETP NASU, orcid.org/0009-0002-1949-4496, e-mail: tkachtkach1@gmail.com*

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2025.5>

The principle of operation and design of microrefrigerators (MRCs) with the Joule-Thomson effect for cooling microelectronics and infrared sensors are considered. The organization of countercurrent heat exchange between a direct compressed gas flow to the throttle and a cooled expanded gas flow after the throttle can reach cryogenic temperatures. The last decades have been devoted to the choice of the design of such MRCs, as well as the development of mathematical models and computer programs to select the optimal parameters of these designs. Based on the miniature dimensions of the MRC itself (3-15 mm in diameter and 3-10 cm in length) and individual parts (fractions of mm) of the heat exchanger. The cooling capacity characteristic of such MRCs is also small and lies in the range of 1-4 watts and depends on the pressure level at the MRC inlet, and the rate of its cooling (self-cooling) reaches several seconds. The operating temperature of the MRC depends on the type of working fluid, for example, nitrogen to reach the level of -196 °C. To ensure minimum working fluid consumption in the MCC, there is a throttle microvalve, which is self-regulating depending on the temperature of the working fluid behind the nozzle. It is concluded that modern modeling is an important tool for detailed analysis of the thermo-gas-dynamic state of the MCC with a Dewar vessel and optimization of their parameters. The cooling capacity characteristic of such MCCs is also small and lies in the range of 1-4 watts and depends on the pressure level at the inlet to the MCC, and the rate of its cooling (self-cooling) reaches several seconds. The operating temperature of the

MCC depends on the type of working fluid, for example, nitrogen to reach the level of -196 °C. To ensure minimum working fluid consumption in the MCC, there is a throttle microvalve, which is self-regulating depending on the temperature of the working fluid behind the nozzle. Thus, the miniaturization of the MCC and the Dewar vessel leads to the conclusion that the possibility of modeling various MCC designs has become an important tool for studying and optimizing the parameters of the thermogas-dynamic state of the MCC, taking into account the average dimensions and individual parts of the MCC, while experimental studies are much more complicated. Based on the title of this work, using the example of a miniature microrefrigerator with a spiral capillary tube with ribs, a nozzle, a frame and a Dewar vessel, the existing typical two-dimensional model of the thermogas-dynamic state of the MCC with a Dewar is considered, which does not take into account temperature gradients in the radial direction, which is a certain problem in modeling. The aim of the work was to supplement the existing two-dimensional mathematical model to the level of a more accurate three-dimensional model to take into account solid parts of the MCC, as well as the use of modern computer technologies for implementing models, which is the novelty of the work. The authors of this work have supplemented the existing two-dimensional model to the level of a more accurate three-dimensional model by adding differential components along the radial axis of the model to take into account all temperature gradients and heat flows, which also significantly affect the overall refrigeration of the MCC. The application of computer technology for modeling the thermo-gasodynamic processes of a microrefrigerator with a Dewar vessel for cooling microcircuits and sensors, namely field CFD and nodal technology for creating both separate and so-called hybrid models, is also considered.

References 6, figures 3, table 1.

**Key words:** microrefrigerators, Joule-Thomson effect, simulation.

1. *Maytal, B.-Z., Pfothner, J. M.* Miniature Joule-Thomson Cryocooling Principles and Practice. New York: Springer Science+Business Media, 2013, 380 p. (International Cryogenics Monograph Series).

2. *Hong, Y. J. et al.* Transactions of the cryogenic engineering conference—cec: Advances in Cryogenic Engineering. Tucson (Arizona), 2010. Available: <https://doi.org/10.1063/1.3422265>.

3. *Chua, H. T., Wang, X., Teo, H. Y.* A numerical study of the Hampson-type miniature Joule–Thomson cryocooler. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, Vol. 49, pp. 582–593.

4. *Hong, Y.-J., Park, S.-J., Choi, Y.-D.* A Numerical Study of the Performance of a Heat Exchanger for a Miniature Joule-Thomson Refrigerator. International Cryocoolers Conference Inc., Boulder, CO, 2009, pp. 379-386.

5. *ANSYS FLUENT 14.0.* Documentation. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node1.htm> (accessed 15.07.2025).

6. *Flownex SE 2021.* Documentation. Available: <https://flownex.com/resources/> (accessed 21.03.2025).

*Отримано 30.07.2025*

*Received 30.07.2025*

*Прийнято до друку 05.08.2025*  
*Accepted for publication 05.08.2025*