

ГІБРИДНЕ CFD- ТА ВУЗЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОХОЛОДИЛЬНИКІВ З ЕФЕКТОМ ДЖОУЛЯ–ТОМСОНА

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Анотація

Запропоновано гібридну математичну модель мікрохолодильника з ефектом Джоуля–Томсона, яка поєднує CFD-технологію та вузловий підхід. Модель дозволяє аналізувати температурні поля, теплові потоки та термогазодинамічні процеси в конструкції мікрохолодильника. Досліджено вплив рівня вакууму в посуді Дьюара на теплопритоки та експлуатаційні характеристики пристрою.

Ключові слова: мікрохолодильник, ефект Джоуля–Томсона, CFD-моделювання, математична модель, теплообмін, посуд Дьюара.

Abstract

A hybrid mathematical model of a Joule–Thomson microcooler combining CFD technology and nodal modeling is proposed. The model makes it possible to analyze temperature fields, heat fluxes and thermogasdynamic processes in the microcooler structure. The influence of the vacuum level in the Dewar vessel on heat leaks and operating characteristics of the device has been investigated.

Keywords: microcooler, Joule–Thomson effect, CFD simulation, mathematical model, heat transfer, Dewar vessel.

Вступ

Мікрохолодильники з ефектом Джоуля–Томсона широко використовуються для охолодження інфрачервоних датчиків, мікроелектронних компонентів та елементів систем наведення [1]. Завдяки компактним розмірам і здатності забезпечувати криогенні температури вони знайшли застосування в космічній, медичній та оборонній техніці. Для підвищення ефективності роботи таких пристроїв важливим є дослідження процесів теплообміну та оптимізація конструкції за допомогою сучасних методів математичного моделювання.

Метою роботи є розроблення гібридної математичної моделі мікрохолодильника з ефектом Джоуля–Томсона на основі поєднання CFD-технології та вузлового підходу для аналізу термогазодинамічних процесів і теплопритоків.

Результати дослідження

Розглянуто конструкцію мікрохолодильника типу Хемпсона, що складається з оребреної капілярної трубки, сопла, оправ та сосуда Дьюара [2]. Основним принципом роботи є охолодження газу внаслідок ефекту Джоуля–Томсона після його дроселювання.

Запропоновано тривимірну математичну модель конструкції мікрохолодильника, яка враховує теплопровідність у твердих елементах, теплообмін між потоками азоту високого та низького тиску та теплопритоки із навколишнього середовища [3].

Для аналізу температурних полів у корпусі та посуді Дьюара використано CFD-підхід, а для розрахунку параметрів робочого газу в каналах теплообмінника – вузлової моделі. Поєднання цих підходів дозволяє забезпечити достатню точність результатів при помірних обчислювальних витратах.

За допомогою моделі досліджено вплив рівня вакууму в посуді Дьюара на теплопритоки та холодопродуктивність системи. Встановлено, що погіршення вакууму призводить до суттєвого зростання теплових втрат і витрати азоту [4]. Також підтверджено ефективність застосування додаткової теплоізоляції тримача для зменшення теплопритоків до криогенної зони.

Висновки

Розроблено гібридну математичну модель мікрохолодильника з ефектом Джоуля–Томсона, що поєднує CFD-технологію та вузловий підхід. Запропонована модель дозволяє досліджувати температурний стан конструкції, аналізувати теплопритоки та оцінювати вплив конструктивних параметрів на холодопродуктивність пристрою. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції мікрохолодильників, призначених для охолодження інфрачервоних датчиків та елементів систем наведення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hampson W. Improvements relating to the progressive refrigeration of gases : British Patent No. 10165. Great Britain, 1895.
2. Hong Y. J., Park S. J., Choi Y. D. A Numerical Study on the Performance of the Miniature Joule–Thomson Refrigerator. AIP Conference Proceedings. Tucson (Arizona). 2010. P. 103–110.
3. Круковський П. Г., Ткач В. М. Моделювання мікрохолодильників з ефектом Джоуля–Томсона. Теплофізика та теплоенергетика. 2025. № 3(47). С. 54–61.
4. Круковський П. Г., Ткач В. М. Вплив теплопритоків на холодопродуктивність криогенного мікрохолодильника з ефектом Джоуля–Томсона. Теплофізика та теплоенергетика. 2026. № 2(49). С. 55–61.

Ткач Віктор Миколайович – аспірант, Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, e-mail: tkachtkach1@gmail.com

Науковий керівник: **Круковський Павло Григорович** – д-р техн. наук, професор, Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ. e-mail: kruk_2@ukr.net

Viktor M. Tkach – PhD student, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, e-mail: tkachtkach1@gmail.com

Supervisor: **Pavlo H. Krukovskyi** – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, e-mail: kruk_2@ukr.net