PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 27, No. 2 (2026) pp. 346-355
Section: Technology

DOI: 10.15330/pcss.27.2.346-355

Vasyl Stefanyk Carpathian National University

ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 27, № 2 (2026) С. 346-355
Технічні науки

PACS: 44.05.+e

ISSN 1729-4428 (Print)
ISSN 2309-8589 (Online)

І.Р. Ващишак, С.П. Ващишак, Т.М. Мазур, М.П. Мазур

Експериментальне дослідження теплопередачі гнітової теплової трубки з оседям з магнітної нержавіючої сталі при різних кутах її нахилу

Івано Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна,
tetiana.mazur@nung.edu.ua

Представлено результати експериментального дослідження функціонування гнітової теплової трубки з інноваційною системою індукційного нагріву. Робота є логічним продовженням теоретичних досліджень, опублікованих авторами у 2025 році, та спрямована на верифікацію математичної моделі теплових процесів у системі «індуктор – магнітне осердя – теплоносій». Конструкція досліджуваної трубки включає мідний корпус, гніт на основі сітки з нержавіючої сталі AISI 304 та феромагнітне осердя зі сталі AISI 430. Нагрівання здійснювалося за допомогою паралельного резонансного контуру на частоті 28,15 кГц.

Метою роботи було визначення впливу кута нахилу на теплову ефективність трубки в низькотемпературному діапазоні (18–50°C). Описано архітектуру експериментальної установки, що включає двоканальний термометр на базі мікроконтролера Arduino та плівкових терморезисторів, які забезпечують високу точність вимірювань у зонах випаровування та конденсації.

В результаті серії експериментів отримано сімейства температурних кривих для кутів нахилу 30°, 45°, 60° та 90°. Встановлено, що при вертикальній орієнтації (90°) трубка демонструє найвищу ізотермічність та мінімальний час виходу на стаціонарний режим. Виявлено характерний температурний поріг активації фазового переходу в районі 30–32°C. Доведено, що при зменшенні кута нахилу нижче 30° теплова ефективність суттєво знижується, що зумовлено обмеженим капілярним потенціалом сталевого гніта AISI 304, який не забезпечує достатнього повернення конденсату в зону нагріву в умовах слабкого впливу гравітаційної складової. Отримані дані дозволяють оптимізувати параметри теплових трубок для їх застосування в мобільних системах індивідуального обігріву, зокрема в термокаремах, та вказують на необхідність модернізації гнітової структури для роботи в горизонтальному положенні.

Ключові слова: експериментальна установка, гнітова теплова трубка, індукційний нагрів, кут нахилу, теплопередача, теплова ефективність.

Подано до редакції 09.04.2026; прийнято до друку 28.05.2026; опубліковано 27.06.2026.

Вступ

Системи індивідуального обігріву тіла людини, інтегровані у каремати та мобільні матраци, представлені кількома основними типами. Найбільш поширеними є електричні каремати, що використовують гнучкі дротяні нагрівальні елементи, або карбонові плівки. Вони забезпечують швидке підвищення температури та можливість регулювання теплового режиму, проте мають обмеження щодо рівномірності розподілу тепла та ризики локального перегріву [1, 2].

Зокрема, дослідження гнучких електронагрівальних елементів показують, що дротяні нагрівачі характеризуються локалізованим тепловиділенням уздовж провідника, що призводить до температурних градієнтів по поверхні виробу. Водночас карбонові плівки та композитні матеріали на основі вуглецевих нанотрубок або волокон забезпечують більш рівномірний розподіл температури завдяки площинному характеру провідності, однак їх ефективність значною мірою

залежить від однорідності структури та якості контактів [3-5]. Додатково встановлено, що при підвищених густинах струму можливе виникнення локальних перегрівів, пов'язаних із неоднорідністю електричного опору, що обмежує довговічність таких систем та потребує застосування засобів термостабілізації і контролю [6,7].

Іншим класом є рідинні системи, де тепло переноситься циркуляцією підігрітої води чи антифризу через гнучкі канали всередині каремата. Такі системи забезпечують більш рівномірний розподіл тепла завдяки конвективному механізму теплопереносу, але потребують насосів та додаткових джерел живлення, що ускладнює конструкцію та знижує її надійність у польових умовах [1,3,8]. Крім того, наявність рідинного контуру підвищує ризики витоків і ускладнює експлуатацію при низьких температурах.

Окремо виділяють повітряні та гібридні системи, зокрема надувні матраци з інтегрованим підігрівом, які поєднують теплоізоляцію та активний обігрів. Такі конструкції дозволяють зменшити тепловтрати за рахунок повітряного прошарку, однак характеризуються більшими габаритами, інерційністю теплового режиму та обмеженою механічною міцністю, що ускладнює їх використання в мобільних і військових застосуваннях [9-11].

Крім того, застосовуються системи терморегуляції на основі термоелектричних елементів (елементів Пельтьє), які можуть працювати як у режимі охолодження, так і в режимі обігріву, проте їхній коефіцієнт корисної дії залишається низьким через фундаментальні обмеження термоелектричних матеріалів і додаткові втрати Джоулевого тепловиділення, а конструкція є чутливою до механічних і термічних навантажень [12,13]. Це обмежує їх широке застосування у портативних системах індивідуального обігріву.

Для туристів та військових особливо важливими є висока надійність, міцність та автономність системи, адже вона повинна працювати у складних кліматичних умовах, при обмежених джерелах енергії та підвищених механічних навантаженнях. Саме тому актуальним є пошук нових технологій, здатних забезпечити ефективний теплообмін, простоту конструкції та довговічність. Тому перспективним напрямом є використання теплових трубок з індукційним нагрівом, які поєднують високу теплову ефективність, відсутність рухомих частин та можливість роботи у мобільних системах індивідуального обігріву.

I. Постановка задачі

Для того, щоб оцінити адекватність математичної моделі теплової трубки [14] в практичних умовах та визначити її теплову ефективність за допомогою індукційного нагріву паралельним резонансним контуром, необхідно створити експериментальну установку, яка дасть змогу визначити перепади температур по довжині корпусу трубки в діапазоні 18-50°С при різних кутах її нахилу (з дискретністю 10°) та дослідити доцільність застосування теплової трубки як елемента системи для зігрівання тіла людини в польових умовах.

Вперше експериментально підтверджено ефективність гнітової теплової трубки з індукційним нагрівом у діапазоні 18–50°C та верифіковано математичну модель теплопереносу. Встановлено температурний поріг активації фазового переходу (30–32°C) і критичний кут нахилу (~30°) для гніта зі сталі AISI 304, нижче якого різко знижується теплова ефективність. Запропоновано підхід до її підвищення в горизонтальному положенні шляхом оптимізації параметрів теплоносія та модернізації гнітової структури.

II. Виклад основного матеріалу

За даними наукової праці [14] була виготовлена мідна теплова трубка з феромагнітним осердям для індукційного нагріву змінним струмом фіксованої частоти. Гніт з нержавіючої сталі вибраний з міркувань його низької корозійної активності. Вакуумний клапан та нижня кришка приєднувались до тіла трубки методом пайки олов'яно-свинцевим припоєм. Робочий тиск насиченої пари всередині вакуумованої теплової трубки становив 12,3 кПа при температурі 50 °С. Вага трубки становила 270 г. Параметри матеріалів, з яких виготовлена теплова трубка, наведені в таблиці 1.

Науковцями, які займаються вивченням теплових трубок, створено кілька дослідних установок, які дають змогу змінювати орієнтацію трубок у просторі [15,16]. Однак ці установки є надто складними та об'ємними. Для даного дослідження запропонована малогабаритна установка простої конструкції, що дозволяє змінювати нахил теплової трубки від 90 до 0°, нагрівати її та досліджувати температуру у її верхній та нижній частинах.

Функціональна схема експериментальної установки для дослідження теплопередачі виготовленої теплової трубки (без системи зміни її нахилу) наведена на рис. 1. Температура трубки вимірювалася двома давачами (терморезисторами) Rt1, Rt2, закріпленими в нижній (5 см від нижнього кінця) та верхній (1 см від верхнього кінця) її частинах. Сигнали з давачів подавалися на мостові вимірювальні схеми 2-х канального блока вимірювання температури A1 з індикацією показів. Там вони оброблялися платою Arduino UNO та відображалися на цифровому табло кожного з каналів, а також передавались на ПК через USB-порт. Живився блок вимірювання температури A1 високо стабільною напругою від джерела UZ1.

Система індукційного нагріву теплової трубки складається з котушки індуктивності (L), намотаної на корпус теплової трубки, та приєднаного паралельно до неї конденсатора (C), що утворюють резонансний L-C контур. Контур працює в режимі резонансу на частоті 28,15 кГц, що забезпечує максимальну потужність нагріву феромагнітного осердя.

Підсилювач потужності (A2) виконаний за напівмостовою схемою на польових MOSFET-

транзисторах [14]. Він здійснює посилення струму сигналу для збудження електромагнітного поля в резонансному L-C контурі.

Задаючий генератор (G1) формує стабільний синусоїдальний сигнал частотою 28,15 кГц, який подається на підсилювач А2.

Цифровий осцилограф (PS1) підключений паралельно до L-C контуру та виходу задаючого генератора для контролю резонансних явищ та форми сигналу.

Оскільки теплова трубка повинна працювати при досить незначних температурах (до +50 °С), то для експериментальної установки був розроблений 2-канальний термометр (рис. 2), призначений для прецизійного вимірювання та візуалізації температури у двох точках теплової трубки (випаровувач та конденсатор). Вхідний каскад термометра U1 містить двоканальну мостову вимірювальну схему на базі операційного підсилювача LM324 (DA1). Це дозволяє перетворювати зміну опору терморезисторів (Rt1, Rt2) у напругу з високою завадостійкістю. Додаткова стабілізація напруги живлення вимірювальних мостів (R1-R5 та R10-R14) +5,2 В здійснюється стабілізатором 7805 (DA2).

Мікроконтролер Atmega 328 плати Arduino UNO (U2) здійснює аналого-цифрове перетворення та обчислення температури згідно з тарувальними кривими. Для відображення поточних значень температури кожного каналу окремо

Таблиця 1.

Параметри основних матеріалів, з яких виготовлена теплова трубка

Деталь	Матеріал	Довжина, мм	Діаметр, мм	Товщина стінки, мм	Пористість, меш	Об'єм, мл	Кільк. витків
Корпус трубки	Мідь	500	18	1			
Гніт	Нержаві-юча сталь AISI 304	450	16	0,23	100		4
Каркас осердя	S-Glass	30	15	0,3			1
Феро-магнітне осердя	Нержаві-юча сталь AISI 430	26	15,6	0,3			120
Тепло-носій	Дистильо-вана вода					4,5	
Клапан вакуумний	Мідь	12	16	1,2			
Кришка нижня	Мідь	8	16	1			

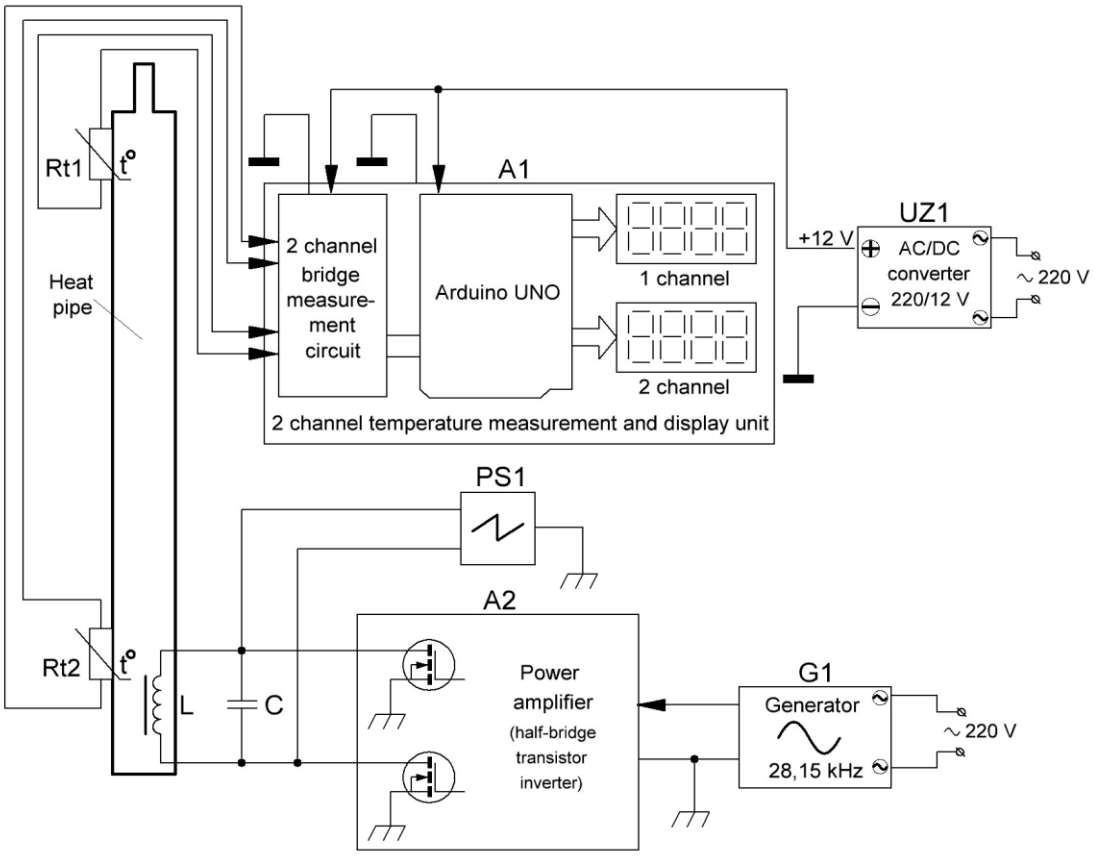

Рис. 1. Функціональна схема експериментальної установки для дослідження теплопередачі гнітової теплової трубки.

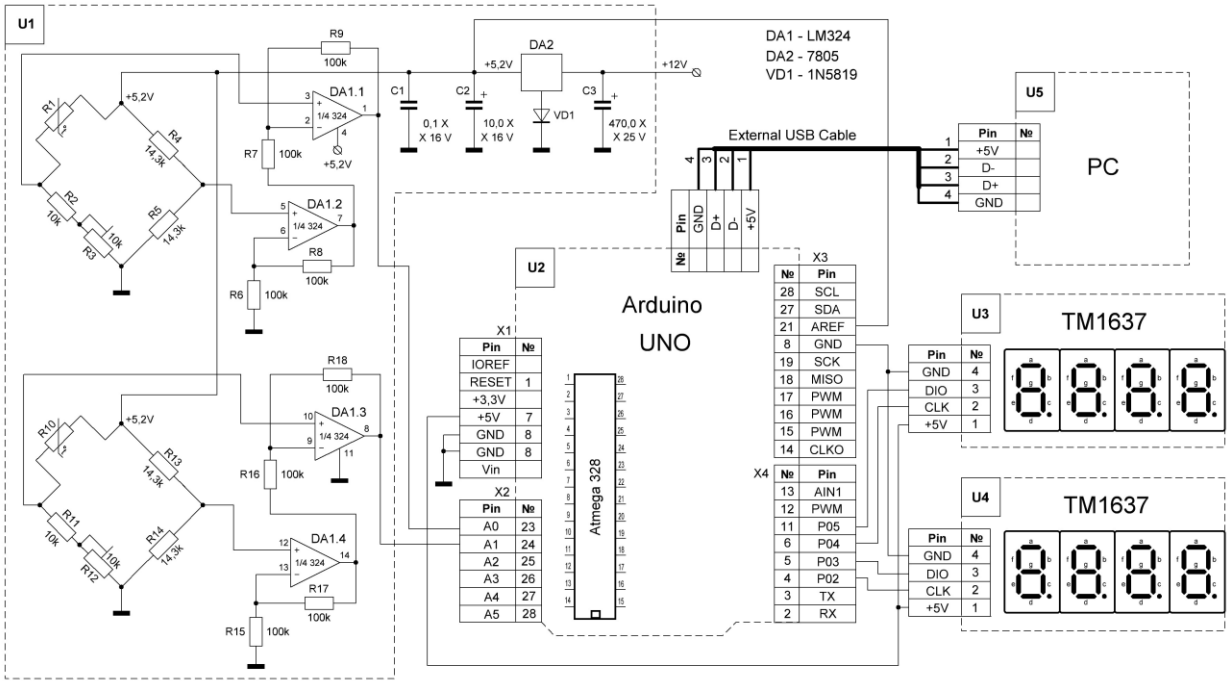

Рис. 2. Схема 2-х канального блока вимірювання температури з індикацією показів.

використовується блок індикації на базі двох модулів TM1637 (U3, U4). Завантаження програми для мікроконтролера та фіксація результатів вимірювань здійснюється за допомогою ПК U5.

Для зняття показів температури з поверхні трубки використані мініатюрні терморезистори в захисній плівковій оболонці з термостійкою ізоляцією, сигнали з яких передаються провідниками у вигляді витої пари для зменшення електромагнітних завад (рис. 3) [17,18]. Тарування давачів Rt1, Rt2 проведено методом порівняння з еталонним термометром Fluke 54 II [19,20] та занурювальною термопарою K-Type у водяному термостаті (рис. 4). Отримані тарувальні криві занесено в програму роботи мікроконтролера для корекції даних з терморезисторів.

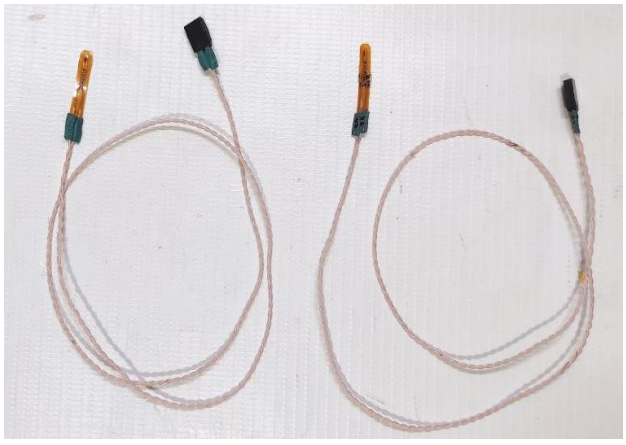

Рис. 3. Зовнішній вигляд терморезисторів.

Зовнішній вигляд теплової трубки з підсилювачем потужності, закритим захисним кожухом з отвором для кріплення до установки, та розміщеними на ній термодавачами зображено на рис. 5.

Рис. 4. Тарування терморезисторів у водяному термостаті.

Рис. 5. Зовнішній вигляд теплової трубки з підсилювачем потужності та термодавачами.

Для зміни кута нахилу теплової трубки та фіксації її положення розроблено спеціальну фільєру, яка дає змогу прикріпити захисний кожух підсилювача до поворотної куліси. Точна фіксація кута нахилу трубки здійснювалась шляхом опирання верхньої її частини на нерухомий термоізоляційний стержень згідно з малюнком на фільєрі (рис. 6). Відстань від поверхні теплової трубки до поверхні фільєри для уникнення теплового екранування становила 20 мм.

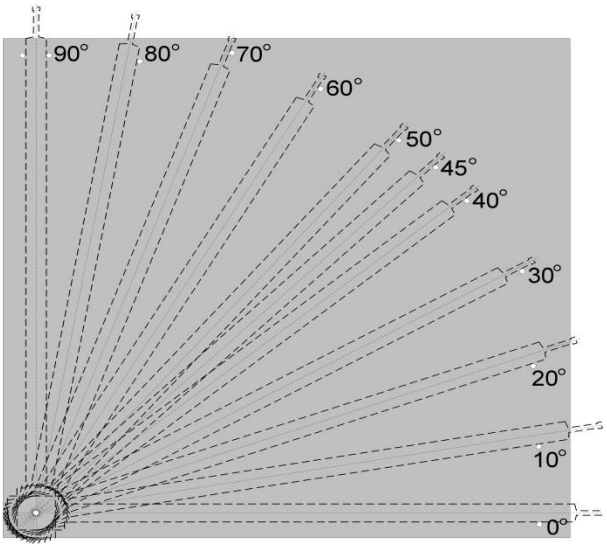

Рис. 6. Фільєра для зміни кута орієнтації теплової трубки.

Зовнішній вигляд експериментальної установки з досліджуваною тепловою трубкою, системою зміни її кута нахилу, 2-канальним термометром та всіма необхідними приладами наведено на рис. 7.

Алгоритм роботи системи індукційного нагрівання теплової трубки для запобігання виникненню значних внутрішніх парових пульсацій передбачав поступове збільшення електричної потужності сигналу, що подається на резонансний L-C контур з 1 до 10 Вт на початковій стадії нагріву (до 24° С). А для запобігання виникнення кризи теплообміну передбачалось поступове зменшення потужності від 10 до 3 Вт на кінцевій стадії нагріву (понад 44°С).

Застосування синусоїдального сигналу збудження резонансного L-C контуру зумовлене необхідністю зменшення електромагнітних завад, які впливають на роботу терморезисторів блока вимірювання температури. При реалізації схеми для практичних застосувань доцільним є використання прямокутних імпульсів та ключів на польових транзисторах для збудження L-C контуру. Це дасть змогу підвищити ККД перетворення електричних імпульсів в теплову та спростити електричну схему.

Початкові температури нижньої частини трубки (термодавач Rt2) при різних кутах її орієнтації становили від +18,0°С до +18,6° С, а верхньої (термодавач Rt1) від +19,5° С до +19,6° С. Нагрів трубки припинявся, коли температура в районі конденсатора (Rt1) досягала +50°С.

Для кожного кута нахилу теплової трубки були отримані температурні криві її розігріву у нижній та верхній частинах (рис. 8). Ці криві значно зашумлені, що пояснюється впливом роботи коливального L-C контуру на термодавачі Rt1 та Rt2, які, маючи значний опір (біля 10 кОм), працювали як антени змінного електромагнітного поля контуру. Також в межах до 20% змінювався струм споживання при максимальній потужності індуктора. Тому обробка експериментальних даних здійснювалася з використанням цифрових методів фільтрації для усунення високочастотних завад від резонансного індуктора, а саме функції Average.

В результаті проведення експериментів були отримані криві зміни температур випаровувача та конденсатора (в С) зі зміною часу (в секундах) для усіх вказаних кутів на фільєрі. Найбільш характерні з них наведені на рис. 9-13. Для кращого розуміння поведінки теплової трубки на рис. 14 та 15 зображено сімейства температурних кривих, знятих у нижній та верхній її частинах.

Проведені експерименти підтверджують головний прогноз моделі [1] про те, що індукційне нагрівання магнітного осердя є ефективним методом ініціації теплового потоку. Температурні криві (рис. 14,15) мають характерний експоненціальний вигляд, що збігається з розрахунковою моделлю теплоємності компонентів.

З рис. 9-13 видно, що зі зменшенням кута нахилу теплової трубки температура верхньої її частини зростає повільніше, що говорить про зменшення впливу гравітаційних сил на процес повернення

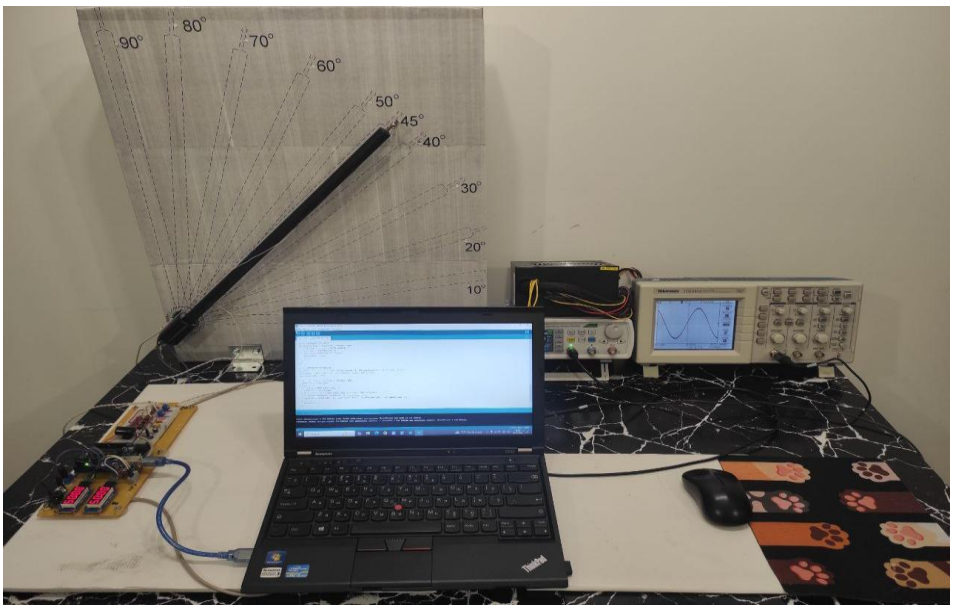

Рис. 7. Зовнішній вигляд експериментальної установки для дослідження теплової трубки.

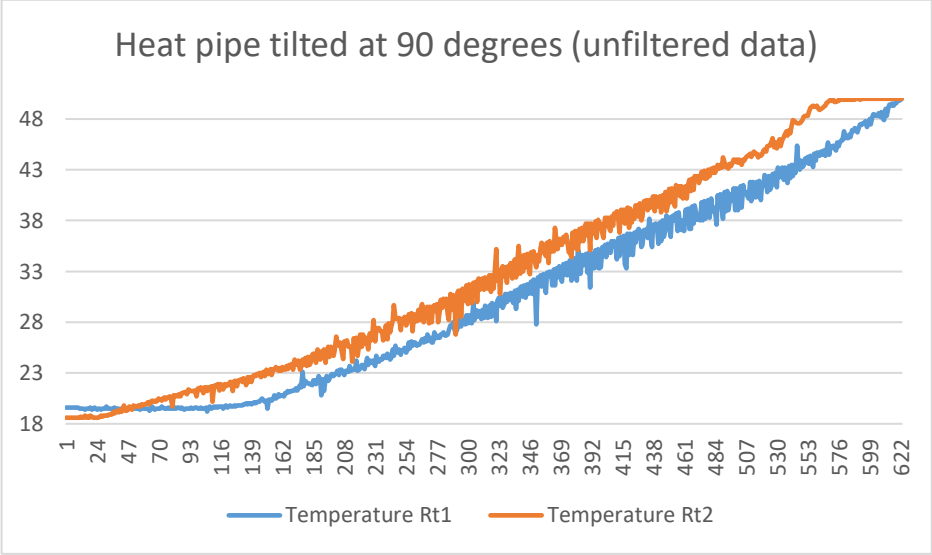

Рис. 8. Температурні криві, зашумлені роботою системи індукційного нагріву теплової трубки (вертикальна орієнтація трубки).

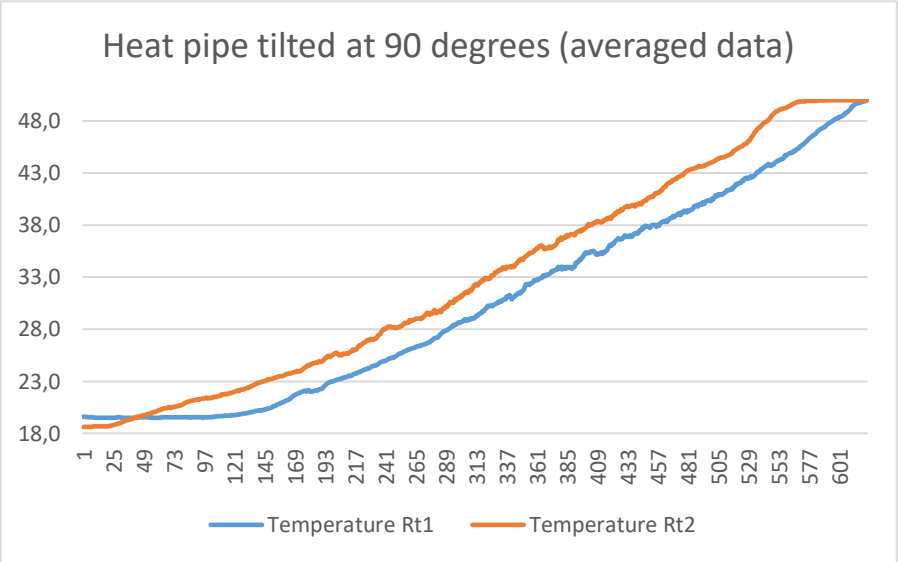

Рис. 9. Температурні криві, очищені функцією Average (вертикальна орієнтація трубки).

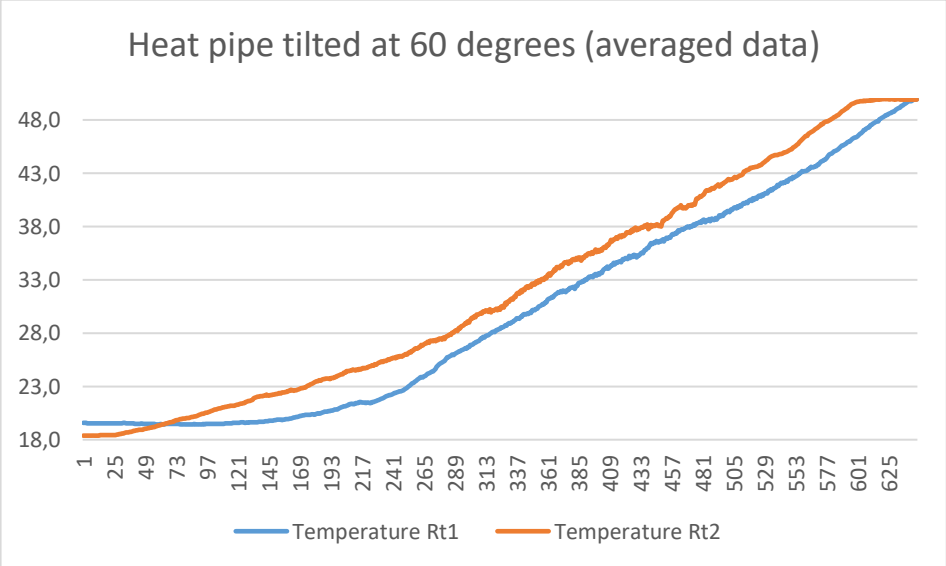

Рис. 10. Температурні криві, очищені функцією Average (нахил трубки 60°).

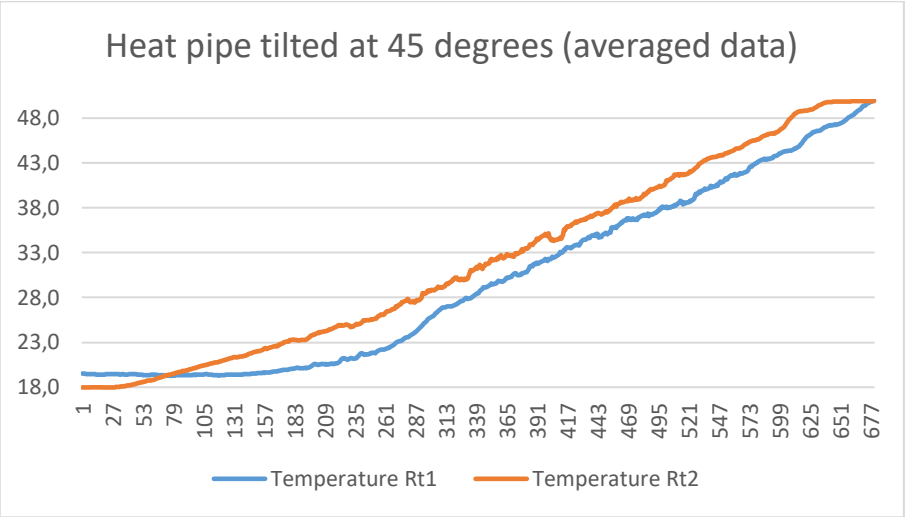

Рис. 11. Температурні криві, очищені функцією Average (нахил трубки 45°).

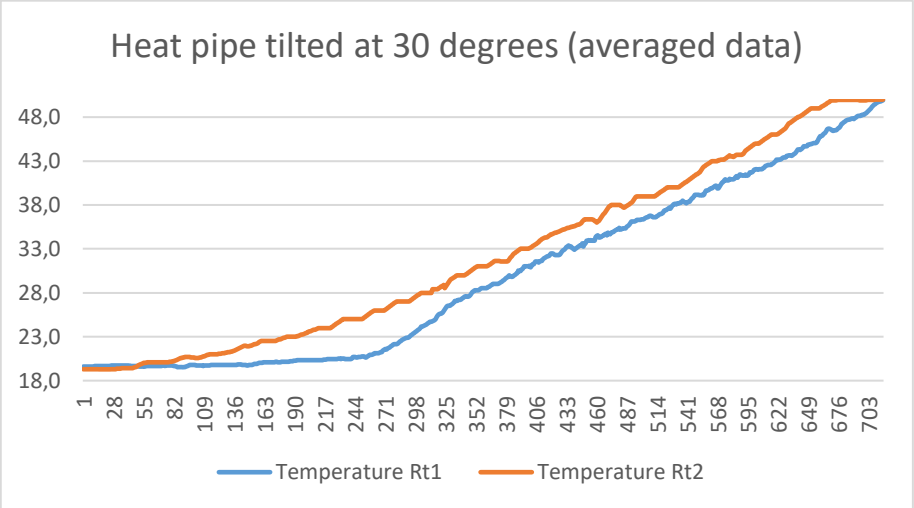

Рис. 12. Температурні криві, очищені функцією Average (нахил трубки 30°).

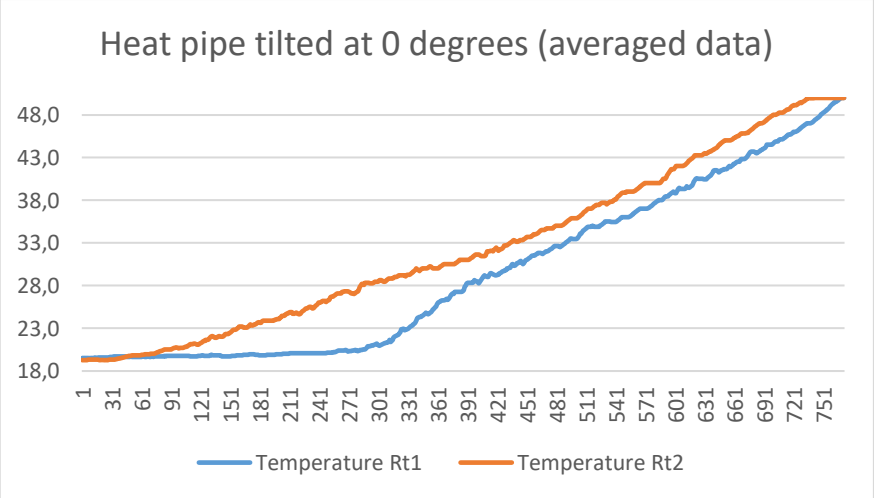

Рис. 13. Температурні криві, очищені функцією Average (горизонтальна орієнтація трубки).

рідини через структуру пористого гніту. При кутах нахилу від 90° до 60° трубка працює в режимі термосифона, де гравітація допомагає капілярним силам повертати конденсат. Тут спостерігаємо найшвидший вихід на стаціонарний режим. При кутах нахилу 30° і менше теплова ефективність падає. При малих кутах нахилу шар рідини розподіляється нерівномірно, що призводить до часткового "осушення" зони нагріву.

На отриманих графіках в межах 30-32° С спостерігається зміна кута нахилу кривої Rt1 (конденсатора). Це свідчить про подолання порогу

тиску пари та досягнення температурного порогу активації фазового переходу.

Наявність мідного корпусу пояснює чому криві Rt1 та Rt2 на рис. 9 (90°) так близько сходяться. Мідь миттєво вирівнює температуру. Але при 30° (рис. 12) розрив збільшується. Це стається тому, що рідина "стікає" в нижню частину трубки, і сталевий гніт не встигає розподілити її по всьому периметру мідної стінки. Експерименти показали, що навіть з ідеальним мідним корпусом кут нахилу залишається критичним фактором. Це підтверджує, що слабкою ланкою є саме сталевий гніт зі сталі AISI 304. Оскільки сталь гірше змочується водою, ніж мідь, капілярний потенціал сітки гніту обмежений. Також в експерименті спостерігається більший градієнт температур між випаровувачем та конденсатором, ніж передбачала ідеалізована модель. Це пояснюється контактним термічним опором між магнітним осердям та внутрішньою стінкою трубки, а також термічним опором сталевого корпусу гніту (AISI 304), який має набагато нижчу теплопровідність, ніж мідь.

З отриманих даних температур зон випаровування та конденсації (рис. 14, 15) видно, що при потужності споживання системи індукційного нагріву трубки біля 10 Вт час виходу на стаціонарний режим становив: при 90° – 300 с, при 60° – 330 с, при 45° – 342 с, при 30° – 388 с, при 0° – 422 с. Максимальної температури зона конденсації досягала: при 90° за 622 с, при 60° за 646 с, при 45° за 680 с, при 30° за 718 с, при 0° за 774 с. Найбільший перепад температур між випаровувачем та конденсатором становив: при 90° – 2,7 С, при 60° – 3,3°С, при 45° – 4,0°С, при 30° – 4,8 С, при 0° – 7,8 С.

З аналізу сімейств кривих на рис. 14, 15 можна сказати, що практично діюча теплова трубка працюватиме в горизонтальному положенні (на відміну від моделі), але теплова ефективність її буде набагато нижчою, ніж у положеннях, близьких до вертикального. Це обмежує її застосування як елемента системи індивідуального нагріву тіла людини, наприклад у термокаремах, де потрібні нахили, близькі до горизонтального. Для підвищення теплової ефективності трубки у положеннях, близьких до горизонтального, на нашу думку, треба зробити наступне:

– провести дегазацію робочої рідини

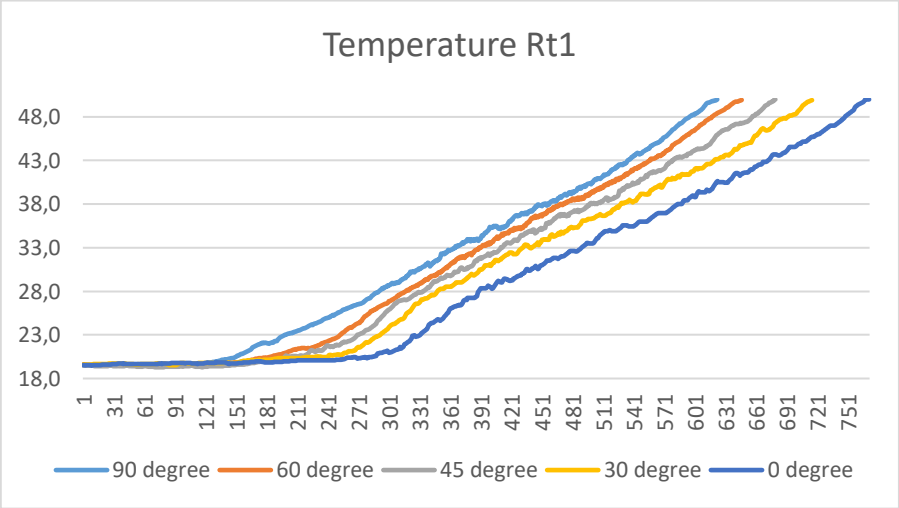

Рис. 14. Сімейство температурних кривих, знятих у верхній частині теплової трубки (зоні конденсації) при різних кутах її нахилу.

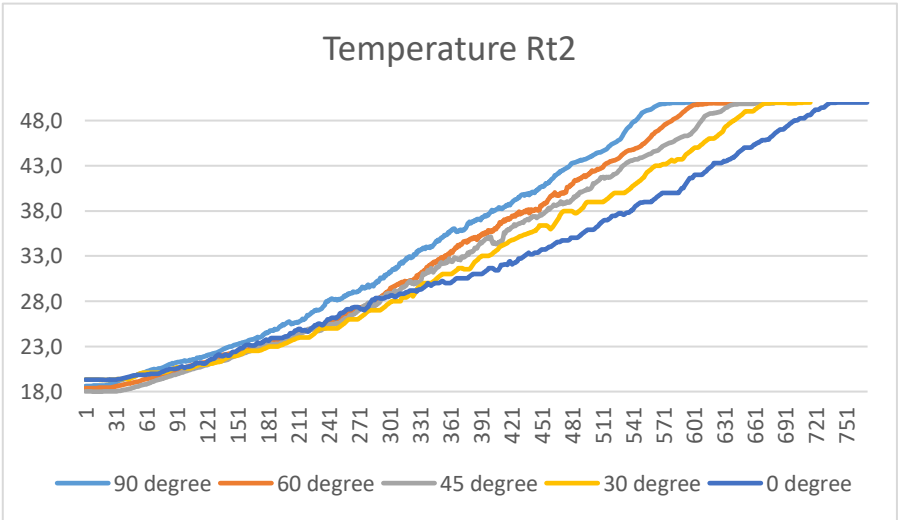

Рис. 15. Сімейство температурних кривих, знятих у нижній частині теплової трубки (зоні випаровування) при різних кутах її нахилу.

(дистильованої води) для усунення виникнення «теплових пробок» – ділянок, де пара не може вільно циркулювати, та зниження хімічної активності середовища, що сприяє корозії міді;

– дозаправити на 10–15% трубку робочою рідиною для збільшення її кількості у горизонтально розміщеному гніті, що зменшить його пересихання;

– замінити матеріал сітки гніту з нержавіючої сталі AISI 304 на мідь для підвищення капілярного тиску завдяки оксидній плівці, зниження крайового кута змочування, і підвищення на порядки теплопровідності.

Гніт з міді має набагато нижчу корозійну стійкість ніж з нержавіючої сталі, але оскільки середовищем буде дегазована дистильована вода та вакуум, а максимальна температура доволі низькою, то корозійні явища будуть дуже сповільнені в часі. Проте мідний гніт матиме низький термічний опір і сильний капілярний ефект, що суттєво підвищить теплову ефективність трубки у положеннях, близьких до горизонтального.

Гніт зі спечених порошків матиме ще вищий капілярний ефект завдяки неоднорідності структури, однак виготовлення його є високовартісним.

Висновки

Експериментальні дослідження підтвердили адекватність математичної моделі теплової трубки з індукційним нагрівом магнітного осердя, похибка між теоретичними та практичними значеннями стаціонарної температури не перевищила 12%. Встановлено, що інтенсивний теплообмін розпочинається при досягненні температури випаровувача 30–32 С, що відповідає початковій фазі активного пароутворення.

Виявлено суттєвий вплив гравітаційної складової на теплову ефективність: найкращі показники ізотермічності досягнуті при кутах нахилу 60 – 90°, де трубка працює в режимі термосифона, забезпечуючи швидкий вихід на стаціонарний режим (300 – 330 с) та мінімальний перепад температур (2,7 – 3,3°С). При зменшенні кута нахилу до 30° і нижче ефективність різко падає, час виходу на стаціонарний режим зростає до 388 – 422 с, а перепад температур сягає 4,8 – 7,8° С, що зумовлено недостатнім капілярним потенціалом сталевої сітки AISI 304. Це підтверджує, що слабкою ланкою конструкції є саме гніт зі сталі, який має високий термічний опір і низьку змочуваність водою.

Для підвищення ефективності роботи трубки у положеннях, близьких до горизонтального, рекомендовано провести дегазацію робочої рідини для усунення теплових пробок, дозаправити трубку на 10–15% додатковою кількістю води для зменшення пересихання гніта та замінити сталеву сітку на мідну, що забезпечить сильний капілярний ефект і низький термічний опір.

Конструкція теплової трубки з мідним корпусом та індукційним нагрівом осердя є перспективною для застосування в термокарематах, однак для стабільної роботи в горизонтальному положенні необхідна модернізація гнітової структури (мідні сітки, або спечені порошки), що дозволить суттєво підвищити теплову ефективність.

Внесок авторів.

І.Р. Ващишак: розробка концепції, методологія, перевірка достовірності, написання – рецензування та редагування.

С.П. Ващишак: концептуалізація, методологія, валідація, написання – рецензування та редагування.

Т.М. Мазур: дослідження, написання – рецензування та редагування, адміністрування проекту.

М.П. Мазур: написання – рецензування та редагування, подання рукопису.

Подяки.

Дослідження Т.М. Мазур було профінансовано Національним фондом наукових досліджень України (проект 2025.07/0427 «Новітні комплексні ймовірнісні методи дослідження асимптотичних властивостей аналітичних розв'язків диференціальних рівнянь, представлених множинними випадковими рядами та інтегралами, та їхні потенційні застосування», 0126U002547).

Vashchyshak I.R. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Energy Management and Technical Diagnostics;
Vashchyshak S.P. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Technologies;
Mazur T.M. – Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department of Physical and Mathematical Sciences;
Mazur M.P. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Architecture, Construction, and Energy.

[1] Shu Fang, Rui Wang, Haisu Ni, Hao Liu, Li Liu, *A review of flexible electric heating element and electric heating garments*, Journal of Industrial Textiles, 51, (2022); https://doi.org/10.1177/1528083720968278.
[2] Song-Lin Jia, Hong-Zhang Geng, Luda Wang, Ying Tian, *Carbon nanotube-based flexible electrothermal film heaters with a high heating rate*, Royal Society Open Science, 5(6), (2018); https://doi.org/10.1098/rsos.172072.
[3] Zhu Zhu, Hao Lu, Wenjun Zhao, Ailidaer Tuerxunjiang, Xiqiang Chang, *Materials, performances and applications of electric heating films*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 184, 113540 (2023); https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113540.
[4] Taejin Kim, Deborah Chung, *Carbon fiber mats as resistive heating elements*, Carbon, 41(12), 2436 (2003); https://doi.org/10.1016/S0008-6223(03)00288-4.

[5] Ya M. Kusyi, O. R. Onysko, A. M. Kuk, O. S. Kostiuk, B. V. Solohub, *Development of the structure and methodological support of the system for analysis of the details shaping*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2540(1), 012026 (2023); https://doi.org/10.1088/1742-6596/2540/1/012026.
[6] Dezhao Li, Yangtao Ruan, Chuangang Chen, Wenfeng He, Cheng Chi, Qiang Lin, Design and Thermal Analysis of Flexible Microheaters, Micromachines, 13(7), 1037 (2022); https://doi.org/10.3390/mi13071037.
[7] Qingshuai Yan et al., *Flexible, high-strength, and breathable electric heater with 3D folding structure for personal thermal management*, Materials Today Energy, 54, 102074 (2025); https://doi.org/10.1016/j.mtener.2025.102074.
[8] Jeong Eun Yoon, Jiwon Chung, Jeongpyo Lee, Seung Hyun Jee, Sumin Helen Koo, *Development and evaluation of cable-less heating mats utilizing low-power carbon nanotube planar heaters*, Textile Research Journal, 95(7–8), 2024; https://doi.org/10.1177/00405175241286545.
[9] ASTM International, Standard Guide for Selection of Materials for Thermal Insulation, ASTM C1055 (2019).
[10] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. (Wiley, Hoboken, 2011).
[11] Y. Li, A.S.W. Wong, Clothing Biosensory Engineering (Woodhead Publishing, Cambridge, 2006).
[12] І. Ващишак, С. Ващишак, Т. Мазур, М. Мазур, *Дослідження впливу осердя на ефективність індукційного нагрівання теплоносія низькотемпературної теплової трубки*, Фізика і хімія твердого тіла, 25(4), 784–794 (2024); https://doi.org/10.15330/pcss.25.4.784-794.
[13] The effects of bed cooling on sleep quality and sleep thermal comfort in overheated bedrooms, Building and Environment (2026); https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2026.114213.
[14] І. Ващишак, С. Ващишак, Т. Мазур, М. Мазур, *Дослідження ефективності теплопередачі гнітової теплової трубки з індукційним нагріванням осердя з магнітної нержавіючої сталі*, Фізика і хімія твердого тіла, 26(3), 613 (2025); https://doi.org/10.15330/pcss.26.3.613-621.
[15] Huanfa Wang, Guiping Li, Xiaobin Shen, Yong Liu, Yuandong Guo, *Experimental Study and Visual Observation of a Loop Heat Pipe*, Energies, 16(13), 5068 (2023); https://doi.org/10.3390/en16135068.
[16] Deepak Dubey et al., Experimental & Theoretical Analysis of Heat Pipe at Different Orientation, IJSRD, 6(2), (2018); https://www.ijsrd.com/articles/IJSRDV6I120699.pdf.
[17] R. Pallás-Areny, J.G. Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 2001).
[18] J.P. Bentley, Principles of Measurement Systems, 4th ed. (Pearson Education, Harlow, 2005).
[19] Fluke Corporation, Fluke 54 II B Digital Thermometer – Technical Data (Everett, WA, 2020).
[20] NIST, Calibration of Temperature Sensors in Liquid Baths (Gaithersburg, 2019).

I.R. Vashchyshak, S.P. Vashchyshak, T.M. Mazur, M.P. Mazur

Experimental study of heat transfer in a wick heat pipe with a magnetic stainless steel wick at various inclination angles

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, tetiana.mazur@nung.edu.ua

This paper presents the results of an experimental study into the operation of a wick-type heat pipe equipped with an innovative induction heating system. This work is a logical continuation of the theoretical studies published by the authors in 2025 and aims to verify the mathematical model of thermal processes in the ‘inductor – magnetic core – heat transfer fluid’ system. The design of the tube under investigation comprises a copper casing, a wick based on an AISI 304 stainless steel mesh, and a ferromagnetic core made of AISI 430 steel. Heating was carried out using a parallel resonant circuit at a frequency of 28.15 kHz.

The aim of the study was to determine the effect of the tilt angle on the thermal efficiency of the tube in the low-temperature range (18–50°C). The architecture of the experimental setup is described, which includes a dual-channel thermometer based on an Arduino microcontroller and film thermistors, which ensure high measurement accuracy in the evaporation and condensation zones.

A series of experiments yielded sets of temperature curves for tilt angles of 30°, 45°, 60° and 90°. It was found that, when oriented vertically (90°), the tube exhibits the highest isothermal behaviour and the shortest time to reach steady state. A characteristic temperature threshold for the activation of the phase transition was identified in the range of 30–32°C. It has been demonstrated that when the tilt angle is reduced below 30°, thermal efficiency decreases significantly; this is due to the limited capillary potential of the AISI 304 steel wick, which does not ensure sufficient return of condensate to the heating zone under conditions of weak gravitational influence. The data obtained allow for the optimisation of heat pipe parameters for their use in mobile personal heating systems, particularly in thermal mats, and indicate the need to modernise the wick structure for operation in a horizontal position.

Keywords: experimental setup, finned heat pipe, induction heating, angle of inclination, heat transfer, thermal efficiency.