

I.P. Ващишак¹, С.П. Ващишак², Т.М. Мазур¹, М.П. Мазур¹

Дослідження впливу осердя на ефективність індукційного нагрівання теплоносія низькотемпературної теплової трубки

¹Івано Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна,
tetiana.mazur@nung.edu.ua

²Університет Короля Данила, м. Івано-Франківськ, Україна

Досліджено вплив феромагнітних матеріалів трьох осердь циліндричної форми з конструкційної сталі та осердя спірального плетіння з магнітної нержавіючої сталі на ефективність індукційного нагрівання теплоносія у низькотемпературній гнітовій тепловій трубці. Два осердя призначались для використання під шаром гніту, а два – за шаром гніту з нержавіючої сітки без магнітних властивостей. Досліджувалась ефективність індукційного нагрівання за допомогою циліндричної котушки, намотаної на поверхню трубки. Зібрано експериментальну установку з теплової трубки, надітої на її нижню частину циліндричної індукційної котушки, генератора імпульсів, підсилювача, силового ключа, ватметра, двох термопар та таймера. Експерименти показали, що на низькій частоті для теплових трубок з вертикальною орієнтацією зі зменшенням товщини стінки залізного циліндричного осердя та збільшенні його радіусу ефективність індукційного нагріву зростає. Для теплових трубок з довільною орієнтацією у просторі найвищу ефективність індукційного нагрівання забезпечує циліндричне тонкостінне одношарове осердя, розміщене після шару гніту. Але найвищу надійність експлуатації та високу ефективність індукційного нагрівання здатні забезпечити суцільне циліндричне осердя, або осердя спірального плетіння з магнітної нержавіючої сталі AISI 430, чи 439, намотане на термостійкий пластмасовий каркас з отворами для руху теплоносія. Максимальний радіус та мінімальна маса осердя повинні забезпечити найвищу інтенсивність нагрівання теплоносія за одиницю часу.

Ключові слова: тепла трубка, індукційне нагрівання, осердя, теплоносій, частота, потужність.

Подано до редакції 18.05.2024; прийнято до друку 18.11. 2024.

Вступ

Термосифони та гнітові теплові трубки є високоефективними теплообмінниками, які мають дуже високі коефіцієнти теплопровідності та мінімальний час розігріву поверхні [1,2]. Завдяки цьому їхня поверхня по всій довжині має мінімальний перепад температури, що дозволяє використовувати їх як елементи швидкого нагрівання певних зон [3,4] вирівнювачі температури, елементи локального розігріву [5], охолодження [6], опалення приміщень [7,8] тощо. На відміну від термосифонів, що ефективно працюють у положенні близькому до вертикального [2,9], теплові трубки можуть працювати ефективно під будь-якими кутами нахилу

завдяки наявності різних типів гнітів [10-12] та робочих рідин [13-15], що суттєво розширює області їхнього застосування [16-19].

Одним з перспективних застосувань теплових трубок може бути використання їх в якості низькотемпературних джерел тепла для зігрівання тіла людини. Більшість призначених для цього пристроїв (наприклад, пледи з обігрівом, електричні ковдри) мають живлення від мережі 220 В, що у періоди вимкнення електроенергії, пов'язані з аварійним станом енергетичних об'єктів внаслідок бойових дій, робить їхню роботу неможливою. На час вимкнення електроенергії люди застосовують акумулятори та павербанки, що можуть служити джерелами енергії для розігрівання

низькотемпературних теплових трубок.

Визначимо, чи вистачить потужності цих пристроїв для живлення трубок. В середньому людина споживає близько 100 Вт енергії для підтримання основних життєвих функцій в стані спокою. Припустимо, що потрібно підвищити температуру тіла на 1 °С. Для приблизного розрахунку скористаємося відомою формулою для розрахунку кількості теплоти, де приймаємо, що маса тіла $m = 80$ кг, середня теплоємність тіла $c = 3500$ Дж/(кг °С), зміна температури $\Delta T = 1$ °С. Тоді кількість теплоти $Q = 80 \cdot 3500 \cdot 1 = 28000$ Дж. Перетворивши джоулі в вати (де 1 Вт = 1 Дж/с), отримаємо $280000 \text{ Дж} / 3600 \text{ с} \approx 77,8$ Вт.

Отже, 7-8 теплових трубок з потужностями близько 10 Вт здатні зігріти середньостатистичну людину. Враховуючи, що теплові трубки повинні розміщуватись у спальному мішку чи іншому теплоізоляційному матеріалі з низькими тепловими втратами, цієї потужності може виявитись навіть забагато. Тобто, акумулятор середньої потужності на 12 В або потужний павербанк забезпечать зігрівання людини на кілька годин, протягом яких триває вимкнення електроенергії. Для цього необхідно розробити теплову трубку з ефективною системою нагрівання теплоносія і простою та надійною системою керування.

Температура та ефективність теплової трубки напряму залежать від виду джерела енергії, яке приєднується до нижнього її кінця. Нагрів нижнього кінця теплової трубки можна здійснювати різними способами: зануривши його у потік нагрітої рідини, приєднанням до нього ніхромового чи керамічного нагрівача, або індукційним способом. Спосіб занурення нижнього кінця теплової трубки у колектор з потоком нагрітої рідини забезпечує швидкий розігрів та високу ефективність трубки за рахунок практично повної віддачі тепла потоком, але вимагає додаткових трубопроводів, системи нагріву рідини, насосу та системи електронного керування [20]. Спосіб нагріву за допомогою ніхромового дроту мав теж високу ефективність [21], але з часом показав низьку надійність через зміни площі електричного контакту внаслідок перегрівання та окислення ніхрому. Спосіб нагріву за допомогою керамічного нагрівача вимагає тільки систему його вмикання/вимкання, але дещо знижує ефективність трубки завдяки наявності багаточислової структури через яку передається тепловий потік (нагрівач – термопаста – алюмінієві демпфери – термопаста – поверхня трубки). Основними недоліками способу є необхідність контролю потужності кожного керамічного нагрівача, зменшення теплового потоку з часом через поступову деградацію демпферів та термопаст, низька практична надійність самих нагрівачів [22].

Описані способи передбачають зовнішній нагрів теплової трубки, при якому втрачається певна кількість тепла від джерела енергії, яка розсіюється в навколишнє середовище.

I. Елементи теорії

Перспективним, на нашу думку, є розігрівання теплоносія безпосередньо всередині теплової трубки за допомогою індукційного нагріву [23,24]. Індукційний нагрів дає багато переваг. По-перше, завдяки підбору довжини та діаметру дроту індукційної котушки можна встановлювати необхідні струм, напругу та теплову потужність трубки. По-друге, нагрівання теплоносія здійснюється безпосередньо всередині трубки, що суттєво підвищує швидкість набору температури трубкою. По-третє, поверхня трубки служить радіатором для індукційної котушки і запобігає її перегріву [25,26].

Індукційного нагрівання нижнього кінця теплової трубки можна досягти двома способами (рис. 1): встановленням плоскої спіральної котушки в торці трубки з розміщенням плоского круглого осердя з ферромагнітними властивостями всередині трубки напроти котушки (рис. 1, а) та встановленням циліндричної котушки у нижній частині теплової трубки з розміщенням всередині трубки осердя циліндричної форми з магнітного матеріалу (рис. 1, б).

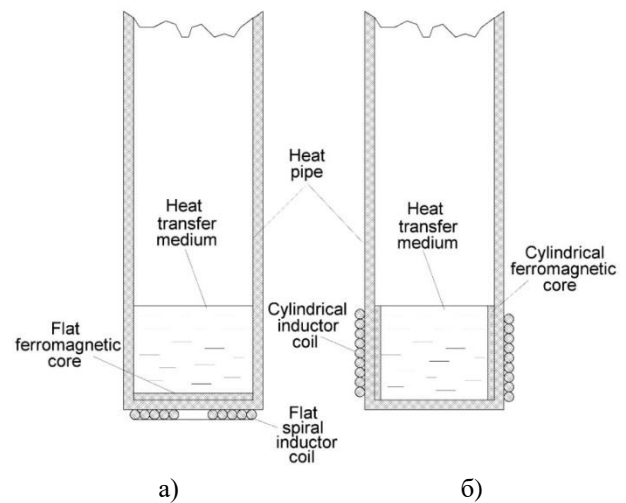


Рис. 1. Способи застосування індукційного нагріву теплоносія у тепловій трубці: а) за допомогою плоскої котушки, б) за допомогою циліндричної котушки.

Перший спосіб (рис. 1, а) ефективніший, оскільки площа плоского круглого осердя є малою і воно має низьку теплову інерційність, що призводить до швидкого розігріву теплоносія. Однак при його реалізації виникають значні технічні труднощі, пов'язані зі складністю виготовлення та встановлення дуже малої плоскої спіральної котушки, високими робочими частотами, складністю налаштування резонансних контурів, необхідністю в складній малогабаритній системі керування. Це вимагає додаткового інтенсивного тепловідводу від елементів системи, що значно знижує її надійність.

Реалізація другого способу індукційного нагрівання теплоносія (рис. 1, б) є технічно привабливішою, оскільки виготовити циліндричну котушку та осердя досить просто, а робочі частоти котушки можуть бути низькими. Це не призведе до розігрівання елементів системи керування, спростить

її конструкцію, дозволить мінімізувати розміри та підвищити надійність.

Дослідженню ефективності індукційного нагрівання за допомогою циліндричної котушки і присвячена ця робота.

II. Експеримент

2.1. Об'єкти досліджень

Для проведення досліджень була використана мідна теплова трубка діаметром 18 мм з товщиною стінки 1 мм, довжиною 50 см. В трубці встановлювався гніт з нержавіючої сітки товщиною 1 мм. Окремо теплова трубка містила герметичний ввід у верхній частині, через який в неї поміщались проводи термопари, яка встановлювалась на рівні рідини – теплоносія.

Вигляд нижньої частини дослідної трубки з котушкою індуктивності показано на рис. 2. Одношарова циліндрична котушка індуктивності була намотана на ізоляційній двошаровій основі (термостійка фарба та шар термопровідної пасти) мідним проводом діаметром 0,25 мм. Котушка мала діаметр 20 мм, довжину 30 мм та розміщувалась у нижній частині дослідної трубки. Біля котушки на теплових ізоляторах розміщувався радіатор з силовим ключем керування котушкою.

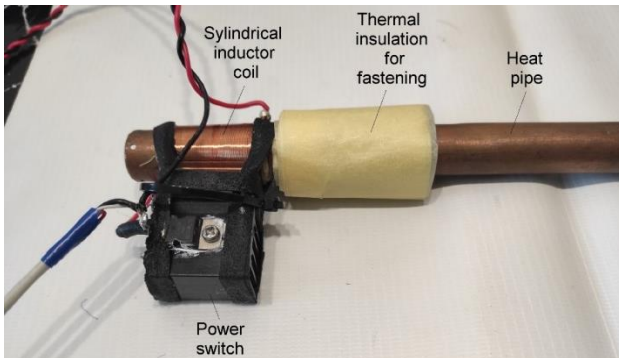


Рис. 2. Вигляд нижньої частини дослідної трубки з котушкою індуктивності.

Для проведення експериментів було виготовлено 4 осердя з феромагнітних сталей без виражених частотних властивостей, параметри яких наведено в таблиці 1.

Зовнішній вигляд осердь зображено на рис. 3. Осердя 1 виготовлено зі спірального плетіння і поміщено у термостійку пластмасову капсулу з отворами для руху теплоносія. Інші осердя – циліндричні з листової сталі. Осердя 1 та 2 призначені для встановлення в теплові трубки після шару гніту. Осердя 3 та 4 призначені для встановлення в термосифони без гніту чи у теплові трубки під шаром гніту. Осердя 1 та 2 призначені для термосифонів і трубок з орієнтацію в просторі, близькою до вертикальної, а осердя 3 та 4 – для теплових трубок з довільною орієнтацією. Розрахунок втрат на гістерезис, струми Фуко та резонансні втрати не проводився, оскільки матеріали осердь не мають визначених значень відносної магнітної проникності та максимальної магнітної індукції.

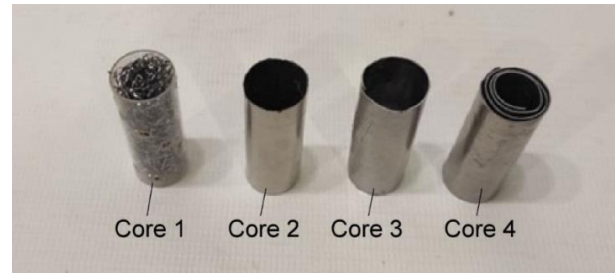


Рис. 3. Зовнішній вигляд осердь, застосованих у дослідженнях.

2.2. Методи досліджень

Структурна схема дослідної установки наведена на рис. 4.

Для зменшення похибки задання частоти як генератор імпульсів використовувалась плата мікроконтролера Arduino UNO, в термінал порту якого значення частоти вводилось з клавіатури PC через USB-кабель. Сигнал прямокутної форми фіксованої частоти знімався з виходу широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) №9 плати мікроконтролера. Однак амплітуда сигналу 5 В не була достатньою для нормальної роботи силового ключа на польовому транзисторі VT4. Тому для її підсилення використано каскад з фіксованим базовим струмом на біполярному транзисторі VT1, резисторах R1 – R3 та розв'язуючому конденсаторі C1. Цей каскад підсилював напругу сигналу до 10 В, але дещо зменшував кути нахилу фронтів імпульсів. Для формування крутих фронтів і спадів імпульсів

Таблиця 1.

Параметри осердь для дослідної установки.

Номер осердя	Вид осердя	Розміщення в трубці	Діаметр, мм	Товщина стінки, мм	Довжина, мм	Вага, г	Матеріал
Осердя 1	З спірального плетіння	Після шару гніту	13,4	-	38	2	Нержавіюча сталь AISI 430
Осердя 2	Циліндричне тонкостінне	Після шару гніту	13,4	0,35	38	2,7	Конструкційна сталь БЗ
Осердя 3	Циліндричне товстостінне	Під шаром гніту	15,4	0,45	38	5	Конструкційна сталь БЗ
Осердя 4	Циліндричне товстостінне багат шарове	Під шаром гніту	15,4	0,45	38	15	Конструкційна сталь БЗ

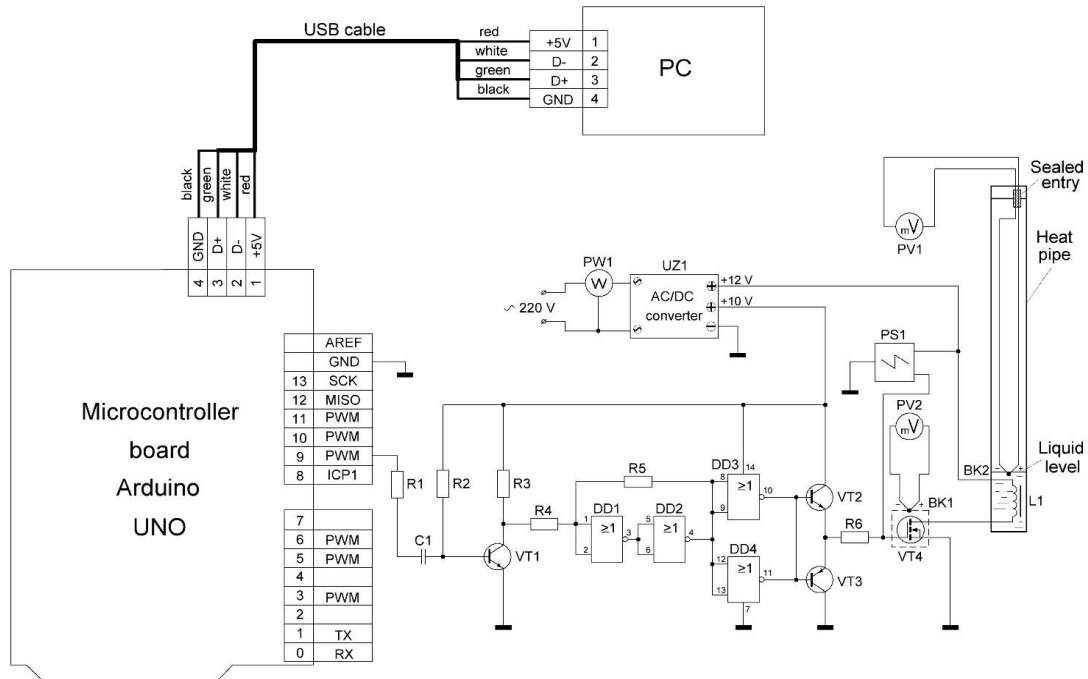


Рис. 4. Структурна схема дослідної установки.

застосовано тригер Шмітта на елементах CMOS-логіки DD1, DD2 (мікросхема CD4001A) та резисторі R5. Резистор R4 служить для узгодження каскаду на транзисторі VT1 з тригером Шмітта. Паралельне з'єднання елементів DD3, DD4 служить для узгодження виходу тригера Шмітта з каскадом підсилення струму на транзисторах VT1, VT2. Резистор R8 узгоджує вихід каскаду підсилення струму з силовим ключем VT4. Навантаженням цього ключа є котушка індуктивності L1, живлення +12 В на яку подається з AC/DC – перетворювача. З цього ж перетворювача стабілізованою напругою +10 В живляться всі каскади підсилювача. Напруга живлення +5 В на плату мікроконтролера подається з PC через USB-кабель. Така схема дослідної установки дозволяє отримати просту і надійну систему керування індукційною котушкою.

В ході експериментів застосовувались такі вимірювальні прилади. Для контролю потужності споживання електроенергії підсилювачем сигналу та котушкою індуктивності – ватметр PW1. Для контролю форми сигналу на вході силового ключа VT1 та на котушці L1 – осцилограф PS1. Для контролю температури силового ключа – термопара BK1 з мілівольтметром PV2. Для контролю температури теплоносія всередині трубки – термопара BK2, занурена у теплоносій біля його верхнього рівня, та мілівольтметр PV1. Для того, щоб вимірювати температуру рідкої фази теплоносія вакуум в середині теплової трубки не підтримувався.

Зовнішній вигляд дослідної установки наведено на рис.5.

Метою експериментів було виявлення ефективності індукційного нагрівання певного об'єму теплоносія кожним з осердь на різних частотах однополярного сигналу прямокутної форми. При цьому використовувався октавний ряд частот: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц. Шпаровитість

сигналу становила 50 %.

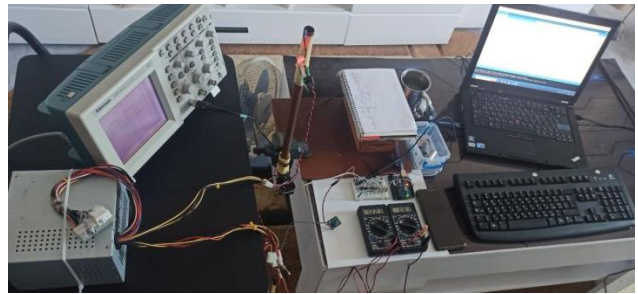


Рис. 5. Загальний вигляд дослідної установки.

Для проведення експериментів дослідна теплова трубка розміщувалась строго вертикально, в неї поміщалося одне з чотирьох осердь і заливалося 10 мг дистильованої води, яка служить теплоносієм у мідних теплових трубках. Процес досліджень розбивався на часові інтервали по 15 хв, протягом яких через кожні 30 с фіксувались зміна температури на поверхні теплоносія та потужність споживання на кожній заданій частоті. Окремо кожні 5 хв фіксувалась температура радіатора силового ключа.

III. Результати досліджень

Вимірювання проводились при початкових температурах теплоносія +25,5 °C та температурі навколишнього повітря 23±1 °C. Результати досліджень наведені на рис. 6.

Нелінійний характер отриманих кривих зумовлений впливом теплових потоків від нагрітого осердя до теплоносія, від теплоносія до внутрішньої стінки трубки, від внутрішньої стінки трубки до зовнішньої стінки, від зовнішньої стінки трубки до навколишнього середовища. В перші хвилини вимірювань теплоносій нагрівається швидко, а

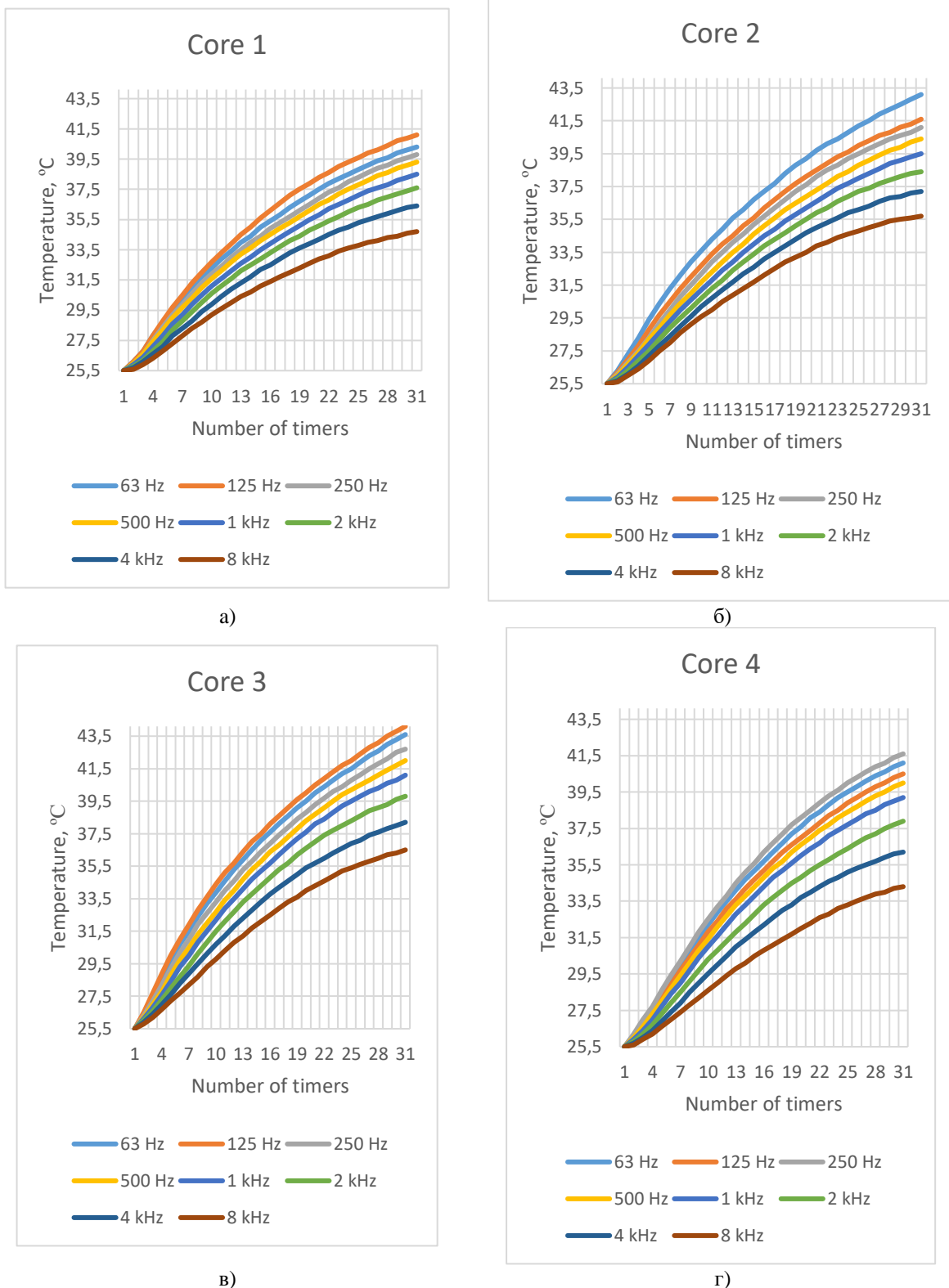


Рис. 6. Результати дослідження ефективності індукційного нагріву при різних осердях.

холодна стінка трубки в місці його знаходження нагрівається повільно, тому інтенсивність нагрівання теплоносія є найвищою. З часом, за рахунок високої теплопровідності міді площа прогрівання трубки збільшується, на що йде більше теплової енергії теплоносія, в результаті чого інтенсивність його нагрівання зменшується. Подальше зниження інтенсивності нагрівання теплоносія зумовлено

збільшенням теплообміну між нагрітою поверхнею трубки та навколишнім середовищем.

Як видно з рис. 6 найбільша ефективність індукційного нагрівання теплоносія осердям 1 спостерігалася на частоті 125 Гц, осердям 2 – на частоті 63 Гц, осердям 3 – на частоті 125 Гц, осердям 4 – на частоті 250 Гц. При цьому температури та інтенсивності нагрівання теплоносія були різними. На

нашу думку, у першу чергу, це пов'язано з резонансними явищами, які призводять до значного збільшення струмів в осерді, що, відповідно, призводить до сильного його нагрівання, а також формою сигналу збудження котушки, бо імпульси прямокутної форми містять гармоніки, що можуть викликати резонанси на певних частотах. Тонкостінні суцільні осердя нагріваються швидше внаслідок меншої теплової маси та мають вищу швидкості передачі тепла теплоносію через тонку стінку. Додаткове нагрівання проводу котушки та осердя спричиняє подача на котушку однополярних імпульсів. Однак, внаслідок низького теплового опору шарів електричної ізоляції котушки, її провід не сильно нагрівався, бо більшість виділеного ним тепла поглиналася поверхнею дослідної трубки, яка розсіює його в навколишнє середовище.

Потужності споживання електричного струму котушкою при роботі з кожним осердям змінювались у вузьких межах. Для осердя 1 максимальна потужність становила 11 Вт на частоті 125 Гц, мінімальна – 8,7 Вт на частоті 8 кГц. Для осердя 2 максимальна потужність була 10,8 Вт на частоті 63 Гц, мінімальна – 8,4 Вт на частоті 8 кГц. Для осердя 3 максимальна потужність становила 10,9 Вт на частоті 125 Гц, мінімальна – 8,7 Вт на частоті 8 кГц. Для осердя 4 максимальна потужність становила 11 Вт на частоті 250 Гц, мінімальна – 8,9 Вт на частоті 8 кГц. Тут наведені усереднені значення потужностей на кожній частоті, оскільки вони знижувались по мірі прогрівання котушки і збільшення її опору.

Отже, максимальна інтенсивність нагрівання за 1 хв, становить (рис. 7): осердя 1 – 1 °С (відліки 3-5), осердя 2 – 1 °С (відліки 4-5), осердя 3 – 1,2 °С (відліки 3-4), осердя 4 – 0,9 °С (відліки 4-5). Осердя 1 та 4 мають майже однакову інтенсивність розігріву на резонансних частотах. При цьому осердя 4 у 7,5 разів важче за осердя 1, а потужність споживання практично однакова – 11 Вт, що говорить про недоцільність застосування важких осердь.

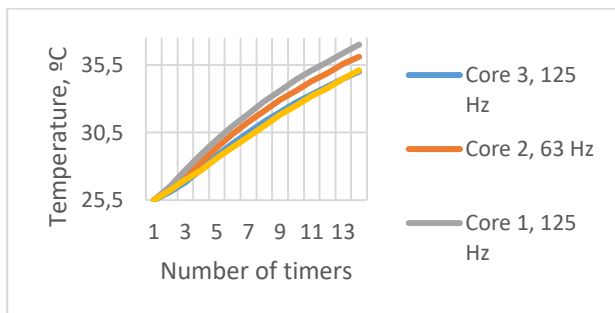


Рис. 7. Максимальні інтенсивності розігріву осердь.

Графік зміни температури силового ключа не наводиться, оскільки він практично не нагрівався і тільки в зоні частоти 8 кГц фіксувалось незначне зростання температури на 3 °С. Окремо був проведений експеримент з контролю нагрівання силового ключа на частотах 16 та 32 кГц, який показав зростання його температури на 4 та 10 °С. Це показало, що в зоні низьких частот можна використовувати силовий ключ без радіатора. Крім того, сама тепла трубка може служити радіатором

силового ключа, оскільки його максимально допустима робоча температура (+150 °С) суттєво вища за максимальну робочу температуру теплової трубки (+50 °С).

Висновки

В результаті досліджень встановлено, що для теплових трубок з орієнтацією у просторі, близькою до вертикальної, найбільшу температуру, найвищу інтенсивність нагрівання теплоносія, та, відповідно, найвищу ефективність індукційного нагрівання забезпечує циліндричне одношарове осердя з конструкційної сталі, розміщене під шаром гніту біля стінок трубки. При зменшенні товщини стінки осердя ефективність індукційного нагрівання зростає через його низьку теплову інерційність. Також ефективність індукційного нагрівання підвищується з ростом відношення площі циліндричного осердя до його об'єму та збільшення радіусу.

Для теплових трубок з довільною орієнтацією у просторі найвищу ефективність індукційного нагрівання забезпечує також циліндричне одношарове осердя з конструкційної сталі, розміщене після шару гніту.

Осердя спірального плетіння з феромагнітної нержавіючої сталі дає нижчу ефективність індукційного нагрівання, але внаслідок рівномірного розподілу в об'ємі теплоносія забезпечує його рівномірне випаровування та оптимальний режим роботи теплової трубки. Крім того, таке осердя має високу корозійну стійкість, що значно продовжує термін експлуатації теплової трубки. Низька ефективність індукційного нагрівання з осердям з нержавіючої сталі зумовлена тим, що воно не є суцільним, а розосереджене по об'єму пластмасової капсули.

В загальному ж, на нашу думку, найвищу надійність експлуатації та високу ефективність індукційного нагрівання теплових трубок з різноманітною орієнтацією у просторі здатні забезпечити суцільне циліндричне осердя, або осердя спірального плетіння з магнітної нержавіючої сталі AISI 430, чи 439, намотане на тонкостінний циліндричний каркас з термостійкої пластмаси з отворами для руху теплоносія. Максимальний радіус та мінімальна маса осердя повинні забезпечити найвищу інтенсивність нагрівання теплоносія за одиницю часу. Авторами планується в подальшому виготовити такі осердя та дослідити реальну їхню ефективність у теплових трубках з міді та нержавіючої сталі.

Вацшиак І.Р. – кандидат технічних наук, доцент кафедри енергетичного менеджменту і технічної діагностики;

Вацшиак С.П. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних технологій;

Мазур Т.М. – доктор філософії, доцент кафедри фізико-математичних наук;

Мазур М.П. – к.ф.-м.н., доцент, директор Інституту архітектури, будівництва та енергетики.

- [1] P.M.E. Vijayakumar, S. Sajairaj, R. Santhoshkumar, *Review on conventional, modern heat pipes and its applications*, International Research Journal of Engineering and Technology, 3(10), 513 (2016); <https://www.irjet.net/archives/V3/i10/IRJET-V3I1099.pdf>.
- [2] B. Abdullahi, K. Al-dadah Raya, S. Mahmoud, *Thermosyphon Heat Pipe Technology*, IntechOpen, 1, (2019); <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.85410>.
- [3] S. H. Noie, M. R Sarmasti Emami, M. Khoshnoodi, *Effect of inclination angle and filling ratio on thermal performance of a two-phase closed thermosyphon under normal operating conditions*, Heat Transfer Engineering, 28(4), (2007); <https://doi.org/10.1080/01457630601122997>.
- [4] V. Prokopiv, I. Horichok, T. Mazur, O. Matkivsky, L. Turovska, *Thermoelectric materials based on samples of microdispersed PbTe and CdTe*. Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP - 2018), Zatoka, Odesa Region, (2018); <https://doi.org/10.1109/NAP.2018.8915357>.
- [5] Mrs. J. Emeema. *Heat Pipes – A Review on Performance Parameters*, International Journal of Creative Research Thoughts, 6(2), 746 (2018); <https://ijcrt.org/papers/IJCRT1892456.pdf>.
- [6] V. Agarwal, S. Jain, K. Vya, G. Jain, *A Review Paper on Role of Heat Pipes in Cooling*, International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics, 11(2), 154 (2015); https://www.academia.edu/29562085/A_Review_Paper_on_Role_of_Heat_Pipes_in_Cooling_CTAE_1_2_GIT_S_3_4?uc-g-sw=85697005.
- [7] I.R. Vashchysyak, S.P. Vashchysyak, V.D. Myndyuk, *Energy-efficient heating system for the premises of technological gas transportation facilities using steam-droplet heaters*, Oil and Gas Energy 2017: Int. science and technology conf., Ivano-Frankivsk, May 15-19, 2017: collection of abstracts adds. – Ivano-Frankivsk, 285 (2017); <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/5842>.
- [8] T. Mazur, V. Prokopiv, L. Turovska, *Quasi-chemistry of intrinsic point defects in cadmium telluride thin films*, Molecular Crystals and Liquid Crystals, 671(1), 85(2018); <https://doi.org/10.1080/15421406.2018.1542088>.
- [9] B. Abdullahi, A. El-Sayed, R. Khalid Al-Dadah, S. Mahmoud, A. Fateh Mahrous, N. Mu'az Muhammad, S. Bello Abbakar, *Experimental and Numerical Investigation of Thermosyphon Heat Pipe Performance at Various Inclination Angles*, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 44(1), 85 (2018); https://www.researchgate.net/publication/324983581_Experimental_and_Numerical_Investigation_of_Thermosyphon_Heat_Pipe_Performance_at_Various_Inclination_Angles#fullTextFileContent.
- [10] X. Lu, Y. Li, Z. Sun, *Research Progress and Prospect of Heat Pipe Capillary Wicks*, Journal of Thermal Science and Engineering Progress, 28, 100 (2022); <http://dx.doi.org/10.5098/hmt.18.24>.
- [11] K. Keishi, M. Akio, *Experimental Study on Thermal Performance of a Loop Heat Pipe with Different Working Wick Materials*, Energies, 14(9), 2453 (2021); <http://dx.doi.org/10.3390/en14092453>.
- [12] V. Kopei, O. Onysko, C. Barz, P. Dašić, V. Panchuk, *Designing a multi-agent plm system for threaded connections using the principle of isomorphism of regularities of complex systems*, Machines, 11(2), 263 (2023); <https://doi.org/10.3390/machines11020263>.
- [13] S. H. Uddin, Md. Islam, F. Jarrar, I. Janajreh, *Experimental Study on the Effect of Water as a Working Fluid in Aluminium Heat Pipes*, Journal of Thermal & Environmental Engineering, 20 (1), (2023); <https://iasks.org/articles/ijtee-v20-i1-pp-01-05.pdf>.
- [14] R. Cai, P. Bai, H. Wang, Y. Luo, X. Cen, G. Wu, S. Li, G. Zhou, *Experimental investigation of the heat transfer performance of a novel double independent chambers casing heat pipe applied for heat dissipation at low temperatures*, Applied Thermal Engineering, 188, 116508(2021); <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116508>.
- [15] J. Vaibhav, J. Harsh, M. Lakshay, *Thermodynamic Performance Evaluation of Heat Pipe*, International Journal of Advance Research and Innovation, 6(1), 55 (2018); <https://doi.org/10.51976/ijari.611810>.
- [16] D.S. Naruka, R. Dwivedi, P.K. Singh, *Experimental inquisition of heat pipe: performance evaluation for different fluids*, Experimental Heat Transfer A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage and Conversion, 1 (2020); <https://doi.org/10.1080/08916152.2020.1713254>.
- [17] R.D. Bhagat , S.R. Thakare , S.C. Makwana, *Experimentation to predict the thermal performance of conventional heat pipe with water and hydrocarbon as working fluid*, International Journal of Research in Engineering and Technology, 5(3), 1 (2016); <https://ijret.org/volumes/2016v05/i03/IJRET20160503073.pdf>.
- [18] B. Dzundza, O. Kostyuk, & T. Mazur, *Software and Hardware Complex for Study of Photoelectric Properties of Semiconductor Structures*. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 16-18 April, (2019); <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783544>.
- [19] G.V.R. Seshagiri Rao, U. Ramakanth & Suryaprakash, *Experimental investigation of heat transfer characteristics of the heat pipe*, International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 7(5), 209 (2017); https://www.academia.edu/35534469/experimental_investigation_of_heat_transfer_characteristics_of_the_heat_pipe.

- [20] I. R. Vashchyshak, O.P. Vashchyshak, A.V. Yavorsky, *Ways to improve energy efficiency of buildings of oil and gas complex facilities*, Scientific Bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 1(36), 176 (2014); <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/2560>.
- [21] I.R. Vashchyshak, S.P. Vashchyshak, O.V. Popovych, E.R. Dotsenko, *Improvement of steam-droplet heaters for heating systems of premises and buildings*, Methods and devices for quality control, 39(2), 68 (2017); <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/6534>.
- [22] S.P. Vashchyshak, T. Lammert, *Electronic control of the temperature regime of the steam droplet heater of the heating system*, Applied scientific and technical research: III International. science and practice conference, Ivano-Frankivsk: Academy of Technical Sciences of Ukraine (April 3-5, 2019), p. 110, Ivano-Frankivsk: Symphony forte (2019); <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2022/02/ConferenceUTSA2019.pdf>.
- [23] Z. Liu, D. Yuan, Y. Hao, X. Li, L. Yang, J. Yao, *Experimental study on heat transfer performance of high temperature heat pipe under axial non-uniform heat flux*, Applied Thermal Engineering, 236, 121817 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121817>.
- [24] H. Nykyforchyn, V. Kyryliv, O. Maksymiv, V. Kochubei, R. Boyko, V. Dovhunya, *Wear resistance of the surface nanocrystalline structure under an action of diethyleneglycol medium*, Applied Nanoscience, 9(5), 1085 (2019); <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0690-3>.
- [25] T. Mazur, M. Mazur, M. Halushchak, *Surface-Barrier CdTe Diodes for Photovoltaics*, Journal of Nano- and Electronic Physics, 15(2), 02004-1 (2023); [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(2\).02006](https://doi.org/10.21272/jnep.15(2).02006).
- [26] A. Kelesoglu, N. Kanmaz, H.M. Unver, & U. Unver, *A review on the evolution of induction fluid heaters*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 44(3), 7949 (2022); <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2118906>.

I.R. Vashchyshak¹, S.P. Vashchyshak², T.M. Mazur¹, M.P. Mazur¹

Study of the influence of the environment on the efficiency of induction heating of low-temperature heat pipe

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, tetiana.mazur@nung.edu.ua
²King Danylo University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

The influence of ferromagnetic materials of three cylindrical structural steel cores and a spiral weave magnetic stainless-steel core on the efficiency of induction heating of the coolant in a low-temperature oppression heat pipe is investigated. Two cores were intended for use under the oppression layer, and two - behind the oppression layer made of stainless mesh without magnetic properties. The efficiency of induction heating using a cylindrical coil wound on the surface of the tube was studied. An experimental setup was assembled from a heat pipe, a cylindrical induction coil put on its lower part, a pulse generator, an amplifier, a power switch, a wattmeter, two thermocouples and a timer. Experiments have shown that at a low frequency of heat pipes with a vertical orientation, with a decrease in the wall thickness of the iron cylindrical core and an increase in its radius, the efficiency of induction heating increases. For heat pipes with arbitrary orientation in space, the highest efficiency of induction heating is provided by a cylindrical thin-walled single-layer core placed after the oppression layer. But the highest operational reliability and high efficiency of induction heating can be provided by a solid cylindrical core, or a spiral-weave core made of magnetic stainless steel AISI 430 or 439, wound on a heat-resistant plastic frame with holes for the coolant movement. The maximum radius and minimum mass of the core should provide the highest intensity of heating of the coolant per unit of time.

Keywords: heat pipe, induction heating, core, coolant, frequency, power.