УДК 536.248.2
DOI https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2405

ВПЛИВ ВИТРАТИ ХОЛОДНОГО ТЕПЛОНОСІЯ НА ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ ДЛЯ ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТА

Алексеїк Є.С., к.т.н. Кравець В.Ю., д.т.н., проф.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Анотація. *Пульсаційні теплові труби (ПТТ) є високоефективними теплопередавальними пристроями та одним із найновіших видів теплових труб. Одним із перспективних напрямків їх застосування є використання у якості основних теплопередавальних елементів рекуперативних теплообмінних апаратів, що знайшли широке застосування в енергетиці, енергозбереженні, хімічній та харчовій промисловості. Серед актуальних напрямків досліджень в області таких теплообмінників важливим є вивчення впливу витрат теплоносіїв на характеристики цих апаратів. Для кращого розуміння цих впливів доцільно проводити подібні дослідження не тільки на теплообмінних апаратах в цілому, але і на їх основних елементах, тобто пульсаційних теплових трубах.*

В роботі приведено результати експериментальних досліджень впливу витрати охолоджуючого середовища на теплопередавальні характеристики мідної одновиткової замкненої ПТТ з теплоносієм водою та коефіцієнтом заповнення 45%. Внутрішній діаметр ПТТ складав 3,1 мм, загальна довжина – 212 мм, довжина зони нагріву – 70 мм, довжина зони конденсації – 142 мм. ПТТ було досліджено у вертикальному положенні з нагрівом знизу в діапазоні підведених теплових потужностей 10-140 Вт. Витрата охолоджувальної води складала 2,9-7 г/с, а її температура 10-15°С. В результаті проведених досліджень було з'ясовано, що при витраті 2,9 г/с перепад температур та термічний опір ПТТ на 20-22% нижчий, а переданий тепловий потік на 35% більший, ніж при вищих значеннях витрати. При цьому зміна витрати в діапазоні 4,5-7 г/с не здійснює помітного впливу на перепад температур та термічний опір ПТТ. Виходячи з цього, для збільшення коефіцієнту теплопередачі в теплообмінних апаратах на ПТТ можна рекомендувати зменшення витрати холодного теплоносія.

Ключові слова: теплообмінний апарат, пульсаційна теплова труба, витрата охолоджуючого середовища, перепад температур, термічний опір.

Вступ. Рекуперативні теплообмінні апарати (ТОА) широко використовуються в енергетиці, енергозбереженні та промисловості, зокрема, в таких галузях як хімічна та харчова. Одним з основних завдань створення нових ТОА є підвищення коефіцієнту теплопередачі між гарячим та холодним теплоносіями. Для цього дослідники та конструктори використовують в якості основних теплопередавальних елементів високотеплопровідні пристрої – теплові труби (ТТ) і, зокрема, пульсаційні теплові труби (ПТТ) – один з найновіших видів ТТ.

Вперше ПТТ було запатентовано японським винахідником Акаші [1]. Вона представляє собою змійовик, виконаний із металевого капіляра. Кінці капіляра можуть бути загерметизовані (ПТТ розімкнутого типу) або з'єднані перемичкою, утворюючи замкнений контур (ПТТ замкненого типу). Змійовик вакуумують та частково заповнюють рідким теплоносієм. Під дією капілярних сил всередині ПТТ з рідини формуються снаряди, простір між якими заповнено парою теплоносія (парові снаряди). При підведенні теплоти до одного з кінців змійовика, який називається зоною нагріву (ЗН), та відведенні від протилежного кінця – зони конденсації (ЗК), починається рух ланцюга, що складається з рідинних та парових снарядів, від ЗН до ЗК. Рушійними силами є різниця тисків, що виникає між ЗН та ЗК, а також сили, що виникають при зростанні та відриві парових бульбашок в ЗН внаслідок кипіння. При цьому відбувається передача теплоти від ЗН до ЗК як у замкненому випарно-конденсаційному циклі (випаровування та кипіння теплоносія в ЗН та його конденсація в ЗК), так і за рахунок перенесення теплоти рідинними та паровими снарядами без зміни фазового стану. Між ЗН та ЗК може також існувати зона транспорту (ЗТ) – частина ПТТ, в якій відбувається лише транспорт теплоносія, а теплообмін із зовнішнім середовищем відсутній. Основними перевагами, завдяки яким ПТТ привернули увагу дослідників, є: простота та дешевизна конструкції, можливість передачі значних теплових потоків при малому перепаді температур та низькому термічному опорі, можливість роботи при будь-якій орієнтації в полі дії масових сил. Детальнішу інформацію щодо конструкцій та принципу роботи ПТТ можна знайти в [2-4].

Прикладами застосування ПТТ в рекуперативних ТОА можуть бути конструкції, описані в [5-8], де також приведено результати їх досліджень. В більшості випадків такий ТОА складається з однієї або декількох багатовиткових ПТТ, виготовлених з міді. Їх ЗН омиваються гарячим теплоносієм і відбирають від нього теплову енергію. ПТТ передає її до ЗК, які омиваються холодним теплоносієм, і віддають йому цю тепло-

ту. На параметри та ефективність роботи таких ТОА впливає значна кількість факторів, одним з яких є витрата холодного теплоносія. Наприклад, автори [8] експериментальним шляхом з'ясували, що збільшення швидкості холодного теплоносія (що при постійній площі прохідного перетину еквівалентно зміні його витрати) з 1,3 до 3,3 м/с призводило до збільшення потужності, що передавав ТОА, з 440 Вт до 821 Вт, проте ефективність зменшувалась з 49% до 36%. Однак для кращого розуміння природи такого впливу, його дослідження варто проводити не лише на ТОА в цілому, як це було зроблено у [8], але і на окремих елементах ТОА, тобто одиничних ПТТ. Проте дослідники не приділяють уваги вивченню впливу витрати холодного теплоносія (або охолоджуючого середовища) на тепло передавальні характеристики ПТТ. В літературі описані лише поодинокі випадки подібних досліджень. Наприклад, в [9] було досліджено систему охолодження електронних компонентів на основі ПТТ при різних швидкостях охолоджуючого повітря, а автори [10] вивчали вплив температури ЗК на роботу ПТТ. Таким чином, дослідження впливу витрати охолоджуючого середовища на теплопередавальні характеристики ПТТ є актуальною задачею.

Мета роботи. Дослідити вплив витрати охолоджуючого середовища на теплопередавальні характеристики пульсаційної теплової труби.

Експериментальна установка.Вирішення поставленої задачі здійснювалось експериментальним шляхом. Для цього було виготовлено замкнену 1-виткову ПТТ (рис. 1). Вибір саме 1-виткової ПТТ обумовлено тим, що дослідження на одному витку як на «елементарній чарунці» багатовиткової ПТТ дозволяють краще зрозуміти досліджувані процеси, нівелювавши при цьому вплив багатовитковості. Такий підхід досить широко застосовується дослідниками, наприклад, його було використано в [11-13].

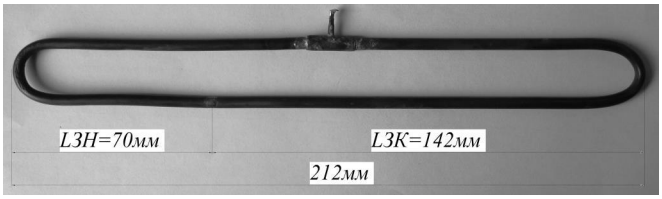
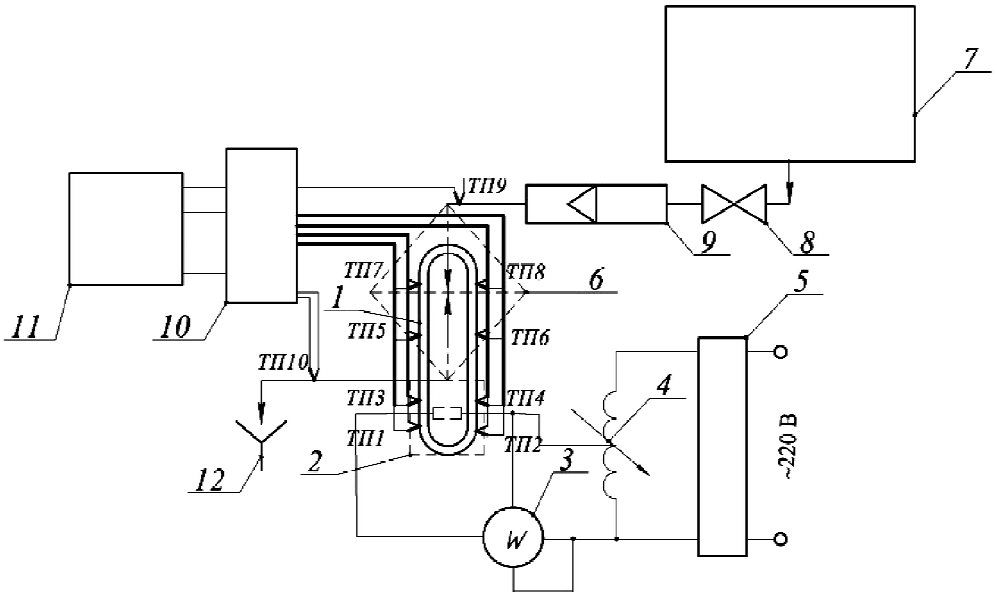


Рис. 1 – Дослідний зразок пульсаційної теплової труби

Дослідний зразок (рис. 1) було виготовлено із мідного капіляра з внутрішнім діаметром 3,1 мм. Загальна довжина ПТТ склала 212 мм, довжина ЗН (L3H) – 70 мм, довжина ЗК (L3K) – 142 мм, ЗТ була відсутня. В якості теплоносія була використана дистильована вода. Коефіцієнт заповнення (відношення об'єму заправленої рідини до загального внутрішнього об'єму ПТТ) складав 45%.

Одновиткову ПТТ було досліджено на експериментальній установці, яку схематично зображено на рис. 2.



1 – пульсаційна теплова труба; 2 – нагрівач; 3 – ватметр; 4 – лабораторний автотрансформатор; 5 – стабілізатор напруги; 6 – теплообмінник-холодильник; 7 – напірний бак; 8 – вентиль; 9 – ротаметр; 10 – модуль збирання даних; 11 – персональний комп'ютер; 12 – зливний отвір

Рис. 2 – Схема експериментальної установки

Дослідна ПТТ 1 (рис. 2) встановлювалась вертикально з нагрівом знизу. Підведення теплоти до ПТТ забезпечувалось електричним нагрівачем 2, який через ватметр 3, призначений для контролю електричної

потужності нагрівача, приєднувався до лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) 4. ЛАТР підключався до мережі змінного струму 220 В через стабілізатор напруги 5.

Нагрівач 2 було виготовлено із двох мідних пластин. На поверхні однієї з них було припаяно мідні капіляри, які формували канавку, в яку вкладалась ПТТ. Інша пластина була притискною. На зовнішніх поверхнях обох пластин було припаяно мідні трубки, всередині яких знаходились електричні нагрівачі, виконані у вигляді спіралей із ніхромового дроту, намотаних на керамічні осердя. Для зменшення контактного термічного опору між ПТТ та нагрівачем використовувалась теплопровідна паста КПТ-8.

Відведення теплоти від ПТТ забезпечувалось теплообмінником-холодильником 6. Охолоджувальна вода до нього подавалась із напірного бака 7 через вентиль 8, який використовувався для регулювання витрати, та ротаметр 9, призначений для її вимірювання. Конструкція холодильника 6 аналогічна конструкції нагрівача, проте через зовнішні трубки пропускалась охолоджуюча вода, яка після проходження через холодильник зливалась у зливний отвір 12. Діапазон витрат охолоджуючої води склав 2,9-7 г/с., а її температура 10-15°С.

Система вимірювання температури складалась із десяти мідь-константанових термопар ТП1-ТП10, модуля збирання даних (МЗД) 10 та персонального комп'ютера (ПК) 11. Вісім термопар ТП1-ТП8 встановлювались на зовнішній поверхні ПТТ за допомогою пайки. При цьому ТП1-ТП4 були встановлені в ЗН, а ТП5-ТП8 – в ЗК. Термопари ТП9 та ТП10 використовувались для вимірювання температури охолоджуючої води на вході та виході з холодильника 6 відповідно. За показами цих термопар калориметричним методом визначалась теплова потужність, яку передавала ПТТ. Всі термопари приєднувались до МЗД 10, який мав вбудований компенсатор холодного спаю, оцифровував покази термопар та передавав їх на ПК 11. Спеціальне програмне забезпечення, встановлене на ПК дозволяло відстежувати зміни показів термопар в реальному часі та виконувати їх запис.

При проведенні дослідів спочатку встановлювався певний рівень витрати охолоджувальної води. Після стабілізації показів всіх термопар на нагрівач подавалась початкова потужність, що складала 10 Вт. Стаціонарний режим, настання якого фіксувалось за відсутністю зростання температури на будь-якій з термопар, витримувався не менше двох хвилин. Після цього потужність збільшувалась до 20 Вт. Подальший крок збільшення потужності складав 20 Вт. На кожній потужності стаціонарний режим витримувався не менше двох хвилин. Дослід припинявся, коли температура в ЗН перевищувала 180°С, оскільки це могло призвести до плавлення припою, що використовувався як для кріплення термопар на поверхню ПТТ, так і в конструкції нагрівача. Покази термопар записувались неперервно під час кожного досліду.

За отриманими під час проведення дослідів даними визначались: перепад температур між ЗН та ЗК та термічний опір ПТТ.

Результати дослідження. Графік залежності перепаду температур ΔТ між ЗН та ЗК від переданого теплового потоку $Q_п$ для різних витрат охолоджуючої води приведено на рис. 3.

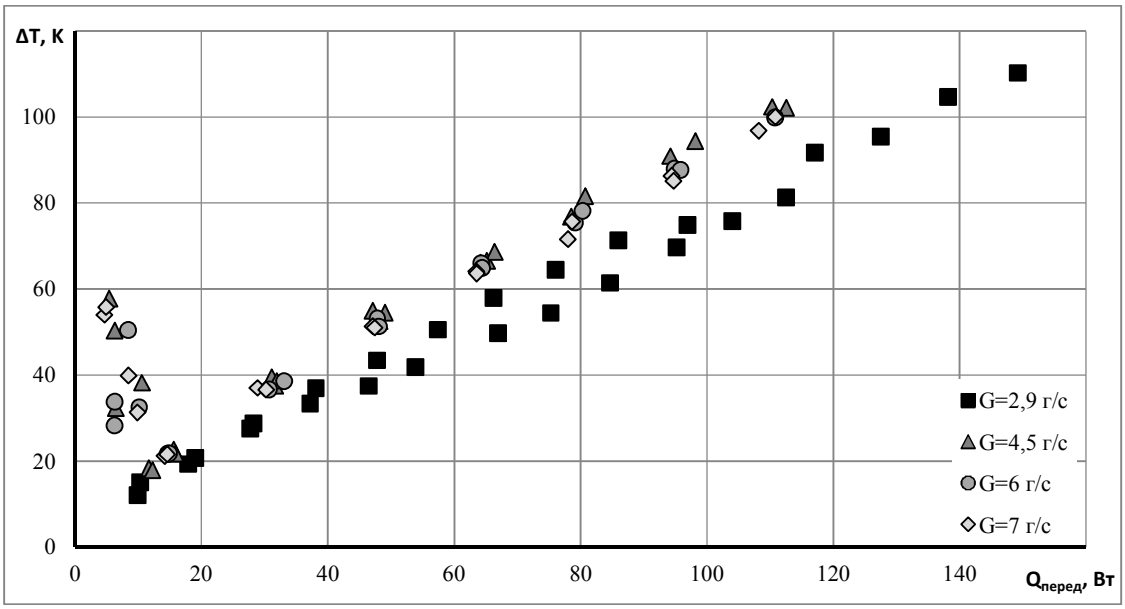


Рис. 3 – Залежність перепаду температур по пульсаційній тепловій трубі від переданого теплового потоку

Як видно з рис. 3, найнижчий перепад температур спостерігається при найнижчому значенні витрати охолоджуючої води 2,9 г/с. В середньому він на 20-22% нижче, ніж при інших, вищих, значеннях витрати. При цьому зміна витрати від 4,5 до 7 г/с не здійснює помітного впливу на перепад температур. Високі значення перепаду температур в діапазоні витрат від 4,5 до 7 г/с при переданих потужностях нижче 20 Вт пояс-

нюються переходом ПТТ від термосифонного режиму роботи до пульсаційного (більш детальну інформацію щодо основних режимів роботи ПТТ можна знайти в [4]).

Вплив витрати на термічний опір ПТТ у вигляді графіка залежності опору від переданого теплового потоку представлено на рис. 4.

В загальному, тенденція впливу витрати на термічний опір аналогічна впливу на перепад температур. При цьому слід зазначити, що чим менший опір має ПТТ, тим більшим буде коефіцієнт теплопередачі між гарячим та холодним теплоносіями в ТОА на ПТТ. Тобто, виходячи з даних, представлених на рис. 4, ТОА на ПТТ працюватиме ефективніше при менших витратах холодного теплоносія. Крім того варто відзначити, що при найменшій витраті 2,9 г/с ПТТ передавала на 35% більші теплові потоки, ніж при вищих значеннях витрати.

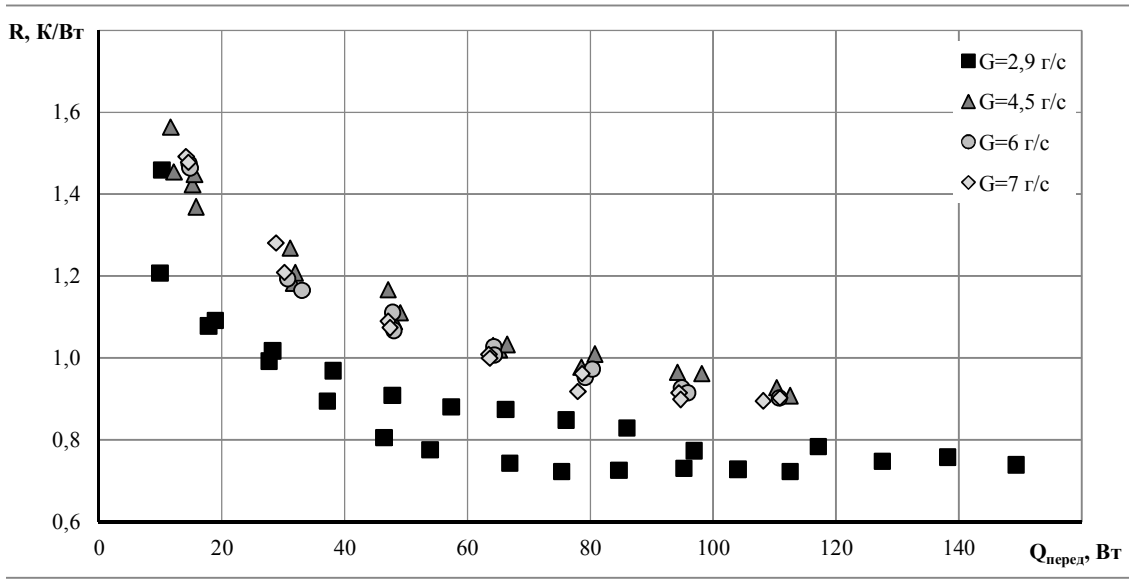


Рис. 4 – Залежність термічного опору пульсаційної теплової труби від переданого теплового потоку

Отримані результати можна пояснити тим, що зі збільшенням витрати охолоджуючого середовища зростає інтенсивність тепловідведення від зовнішньої поверхні стінок ПТТ в ЗК. Це призводить до зниження температури цих стінок і, як наслідок, зростання інтенсивності конденсації пари на внутрішній поверхні стінок. Через це кількість пари всередині ПТТ зменшується і, відповідно, зменшується і внутрішній тиск в ПТТ. При цьому в ЗН відбувається кипіння рідини, і зменшення тиску призводить до збільшення відривного діаметру парових бульбашок. Внаслідок цього бульбашки займають більшу площу поверхні стінки в ЗН, що призводить до зниження інтенсивності теплообміну в ЗН і, як наслідок, до зростання температури стінки в цій зоні. Таким чином, збільшення втирати охолоджуючого середовища призводить до зростання як перепаду температур, так і термічного опору ПТТ.

Висновки. В результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. При витраті охолоджуючої води 2,9 г/с досліджена ПТТ має на 20-22% нижчий перепад температур та термічний опір, і на 35% вищу передану теплову потужність, ніж при вищих значеннях витрати.
2. Зміна витрати в діапазоні від 4,5 до 7 г/с не здійснює помітного впливу на перепад температур та термічний опір ПТТ.
3. Для підвищення коефіцієнту теплопередачі в ТОА на ПТТ можна рекомендувати знижувати витрату холодного теплоносія.

References

1. Akachi, H. (1990). U.S. Patent No. 4,921,041. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
2. Hongbin Ma (2015). Oscillating Heat Pipes. New York, NY: Springer.
3. Kravets, V.Yu. (2018). Heat transfer processes in miniature evaporation-condensation cooling systems. Kharkiv: FOP Brovin O.V.
4. Alekseik, E.S., Kravets, V.Yu. (2012). Flow Patterns Of Basic Operating Modes Of Oscillating Heat Pipes. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 4/8(58), 36-42.
5. Mahajan, G., Thompson, S.M., Cho, H. (2018). Experimental characterization of an n-pentane oscillating heat pipe for waste heat recovery in ventilation systems. Heliyon, vol. 4, iss. 11, Art. no. e00922, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00922.
6. Mahajan, G., Thompson, S.M., Cho, H. (2017). Energy and cost savings potential of oscillating heat pipes for waste heat recovery ventilation. Energy Reports, vol. 3, 46-53 doi: 10.1016/j.egyr.2016.12.002.

7. Mahajan, G., Cho, H., Smith, A., Thompson, S.M. (2020). Experimental Analysis of Atypically Long Finned Oscillating Heat Pipe for Ventilation Waste Heat Recovery Application. Journal of Thermal Science, 29, 667-675, doi: 10.1007/s11630-019-1178-5.
8. Honghai Yang, Jun Wang, Ning Wang, Fengchang Yang, (2019). Experimental study on a pulsating heat pipe heat exchanger for energy saving in air-conditioning system in summer. Energy & Buildings, vol. 197, 1-6, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.05.032.
9. Alekseik, E.S., Kravets, V.Yu. (2013). Oscillating heat pipe cooler for heat-generating elements of electronics. Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature, 1, 19-24.
10. Betancur, L.A., Mangini, D., Mameli, M., Filippeschi, S., Slongo, L.K., Paiva, K… Marengo M. (2016). Condenser Temperature Effect on the Transient Behavior of a Pulsating Heat Pipe, In Proc. Joint 18th International Heat Pipes Conference and 12th International Heat Pumps Symposium, Jeju, Korea, June 12-16, 2016.
11. Alekseik, E.S., Kravets, V.Yu. (2014). Dependence of heat transfer characteristics of the single loop pulsating heat pipe on evaporator length and space orientation, In Proc. XV International Scientific-Practical Conference «Modern information and electronic technologies». Odessa, Ukraine: Politekhperiodika.
12. Zhanxiao Kang, Dahua Shou, Jintu Fan (2021). Numerical study of a novel Single-loop pulsating heat pipe with separating walls within the flow channel. Applied Thermal Engineering, vol. 196, Art. no. 117246, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117246.
13. Zhanxiao Kang, Dahua Shou, Jintu Fan (2022). Numerical study of single-loop pulsating heat pipe with porous wicking layer. International Journal of Thermal Sciences, vol. 179, Art. no. 107614, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107614.

FLOW RATE OF COLD HEAT CARRIER INFLUENCE ON HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF PULSATING HEAT PIPE FOR HEAT EXCHANGER

Alekseik Ye.S., Ph.D., Prof. Kravets V.Yu., Doctor of Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Abstract. *Pulsating heat pipes (PHP) are high efficient heat transfer devices and one of the novel types of heat pipes. Applying of such heat pipes as main heat transfer elements of recuperative heat exchangers, which are widely used in power engineering, energy saving, chemical and food industry, is one of perspective ways. Heat transfer characteristics of such apparatus depend on many factors. Flow rate of heat carriers can be named as one of the most important among them. That's why investigation of its influence on characteristics of these heat exchangers is necessary. Providing of such investigation not only on whole heat exchanger, but also on its main elements, i.e. PHP, is expedient for better understanding of these influences. And studying on single loop PHP allow to eliminate effect of other turns.*

Results of experimental investigation of cooling medium influence on heat transfer characteristics of copper single loop PHP with water as heat carrier and filling ratio of 45 % are presented in this work. Inner diameter of PHP was 3,1 mm, overall length – 212 mm, length of heating zone – 70 mm, length of condensation zone – 142 mm. PHP was investigated in vertical bottom heating position in the range of input heat power 10-140 W. Flow rate of cooling water was 2,9-7 g/s and its temperature 10-15°C. As a result of provided investigation it was found out that temperature difference and thermal resistance of PHP is 20-22 % lower and transferred heat power 35 % higher at flow rate of 2,9 g/s than these ones at the higher values of flow rate. Flow rate changing in the range 4,5-7 g/s has no significant influence on temperature difference and thermal resistance of PHP. Based on this, decreasing of cold heat carrier flow rate can be recommended for increasing of heat transfer coefficient in heat exchangers based on PHP.

Keywords: heat exchanger, pulsating heat pipe, flow rate of cooling medium, temperature difference, thermal resistance.

Список використаної літератури

1. Akachi, H., Structure of a heat pipe, 1990., US Patent 4921041.
2. Hongbin Ma, Oscillating Heat Pipes, New York, NY, USA: Springer, 2015, 427 p.
3. Кравець В.Ю., Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2018 – 288 с.
4. Алексеик Е.С., Кравец В.Ю., Картины движения теплоносителя в основных режимах работы пульсационных тепловых труб. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №4/8 (58). – с. 36-42. doi: 10.15587/1729-4061.2012.5729.

5. G. Mahajan, Scott M. Thompson, Heejin Cho, Experimental characterization of an n-pentane oscillating heat pipe for waste heat recovery in ventilation systems. Heliyon, vol. 4, iss. 11, 2018, Art. no. e00922, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00922.
6. G. Mahajan, S.M. Thompson, H. Cho, Energy and cost savings potential of oscillating heat pipes for waste heat recovery ventilation. Energy Reports, vol. 3, pp. 46-53, 2017, doi: 10.1016/j.egyr.2016.12.002.
7. G. Mahajan, H. Cho, A. Smith, S.M Thompson, Experimental Analysis of Atypically Long Finned Oscillating Heat Pipe for Ventilation Waste Heat Recovery Application. Journal of Thermal Science, iss. 29, pp. 667-675, 2020, doi: 10.1007/s11630-019-1178-5.
8. Honghai Yang, Jun Wang, Ning Wang, Fengchang Yang, Experimental study on a pulsating heat pipe heat exchanger for energy saving in air-conditioning system in summer. Energy & Buildings, vol. 197, pp. 1-6, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.05.032.
9. Алексеик Е.С., Кравец В.Ю., Система отвода теплоты от теплонагруженных элементов РЭА на основе пульсационной тепловой трубы. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2013. – №1. – с. 19-24.
10. L.A. Betancur, D. Mangini, M. Mameli [et al.], Condenser Temperature Effect on the Transient Behavior of a Pulsating Heat Pipe. In Proc. Joint 18th IHPC and 12th IHPS, Jeju, Korea, June 12-16, 2016.
11. Алексеик Е.С., Кравец В.Ю., Зависимость теплопередающих характеристик одновитковой пульсационной тепловой трубы от длины зоны нагрева и ориентации в пространстве. Труды XV Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» – Одесса, 2014 – т.2. – с. 16-17.
12. Zhanxiao Kang, Dahua Shou, Jintu Fan, Numerical study of a novel Single-loop pulsating heat pipe with separating walls within the flow channel. Applied Thermal Engineering, vol. 196, 2021, Art. no. 117246, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117246.
13. Zhanxiao Kang, Dahua Shou, Jintu Fan, Numerical study of single-loop pulsating heat pipe with porous wicking layer. International Journal of Thermal Sciences, vol. 179, 2022, Art. no. 107614, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107614.

Отримано в редакцію 23.05.2022
Прийнято до друку 26.09.2022

Received 23.05.2022
Approved 26.09.2022