



Теплоенергетика та енергозбереження

ВИБІР ТЕПЛОНОСІЯ ДЛЯ ДВОФАЗНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОТУЖНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ ДАТА-ЦЕНТРІВ, ЛІТАКІВ, СУПУТНИКІВ, ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

В. В. Кізіленко, Г. О. Горбенко

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Дата-центри, а також системи електроніки, встановлені в дата-центрах, літаках, космічних апаратах і військовій техніці, характеризуються високою щільністю тепловиділення за обмежених можливостей тепловідведення. Традиційні методи охолодження - повітряне й однофазне рідинне - не задовольняють сучасним вимогам щодо компактності, надійності та енергоефективності.

Радикально підвищити ефективність систем охолодження дає змогу використання двофазних технологій охолодження, які забезпечують мінімальний термічний опір передавання тепла від об'єкта, що охолоджується, в навколишнє середовище завдяки використанню тепловіддачі під час кипіння та конденсації і перенесення тепла у вигляді прихованої теплоти пароутворення. Двофазні технології можуть бути реалізовані у вигляді насосних контурів теплопереносу або холодильних циклів. При цьому до теплоносіїв висувається низка специфічних вимог, що робить вибір теплоносія нетривіальним.

Системи двофазного охолодження для потужної електроніки повинні забезпечувати:

- стабільну роботу в температурному діапазоні від 30 до 70 °C;
- високі коефіцієнти тепловіддачі за великої щільності теплового потоку (до 100 Вт/см² і більше);
- компактність, малу металомісткість і вартість комплектуючих: насосів, компресорів, трубопроводів, пристроїв, що передають тепло;
- працездатність в умовах вібрації, великих прискорень, вакууму;
- високу надійність і тривалий ресурс без обслуговування.

До теплоносіїв двофазних систем висувається низка теплофізичних, експлуатаційних, екологічних, економічних та ін. вимог:

- висока теплоємність, густина, теплопровідність, низька в'язкість пари і рідини, прийнятний тиск насичених парів у робочому діапазоні температур;
- низька температура кристалізації.
- велика прихована теплота пароутворення; критична температура істотно вища за робочі температури (вище 100...120 °C);
- хімічна і термічна стабільність; сумісність з конструкційними матеріалами; діелектрична міцність і безпека для електроніки;
- пожежовибухобезпека, низька токсичність;
- низький потенціал руйнування озонного шару (ODP) та глобального потепління (GWP); можливість природного розкладання в атмосфері;



– доступність і низька вартість.

Повністю задовольнити всі вимоги неможливо. Тому теплоносії підбираються на основі компромісних вимог, індивідуально під кожен проект. Найкращі теплоносії є вода й аміак. Однак вони виключені з подальшого розгляду через неприйнятні експлуатаційні властивості (аміак може використовуватися в космічних безпілотних апаратах). Пріоритет віддається фреонам (HFC, HFO) таких марок:

- HFO-1234ze(E): $T_{\text{кип}} \approx 18,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{GWP} < 1$, слабогорючий;
- R-515B (суміш з R-227ea): $T_{\text{кип}} \approx 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{GWP} \approx 300$, негорючий;
- R-1233zd(E): $T_{\text{кип}} \approx 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{GWP} \approx 1$, термостабільний;
- R134A. $T_{\text{кип}} \approx -26,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{GWP} \approx 1430$, термостабільний;

**Всі температури кипіння були вказані при тиску 1 атм.*

Ці фреони мають $\text{ODP} = 0$, прийнятні властивості для застосування в двофазних системах середньотемпературного діапазону ($30\text{--}70 \text{ }^{\circ}\text{C}$). До теперішнього часу найбільш широко використовується фреон R134A. Але через ненульовий показник GWP його застосування обмежено в Європі 2030-2035 роком.

Оскільки всі фреони (крім R134A) є новими, то необхідно виконати аналіз опублікованих наукових робіт щодо теплофізичних властивостей цих фреонів та оцінити їхню ефективність як теплоносіїв у двофазних системах охолодження електроніки. Метою цього огляду є збір даних про коефіцієнти тепловіддачі (НТС) при кипінні та конденсації в теплообмінниках, термосифонах, термоплатах: експериментальні результати, методи розрахунку НТС та порівняння з R134A.

Огляд статей:

- Wang et al. [2] виконали порівняльне експериментальне дослідження тепловіддачі на фреонах (R1233zd(E) і R515B) в універсальній термоплаті, оптимізованій для роботи на водному розчині гліколю. Експерименти проведено за теплового навантаження 1000 Вт і температури 550C . За однакової об'ємної витрати рідкого теплоносія $0,8 \text{ л/хв}$ фреон R515B мав термічний опір $\sim 0,011 \text{ K/W}$, а R1233zd(E) $\sim 0,014 \text{ K/W}$, що відповідно у 2,6-2,2 разів менше, ніж за використання розчину гліколю. Це відповідає значенням коефіцієнтів тепловіддачі $8000\text{--}9000 \text{ W/(м}^2\text{K)}$. Під час вибору теплоносія слід також враховувати, що фреон R515B має підвищені тиск насичення ($P = 11,3 \text{ бар}$) і $\text{GWP} \approx 300$ порівняно з R1233zd(E) ($P = 3,44 \text{ бар}$ і $\text{GWP} \approx 1$).
- Кеераібоон і Wongwisets [3] дослідили кипіння R134a в мікроканалі ($D = 0.68 \text{ мм}$). Виявлено 6 схем течії: бульбашкова, чергуюча струминна, струминна, струминна з частковим висиханням, плівкова та суха плівкова.

НТС зростає з температурою насичення (при низьких теплових потоках, $5\text{--}15 \text{ кВт/м}^2$), а також із масовою швидкістю (при високих теплових потоках, $25\text{--}35 \text{ кВт/м}^2$). Наприклад, при $G = 200 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$, $q = 10 \text{ кВт/м}^2$: збільшення



температури насичення з 10 °C до 30 °C призводить до зростання НТС з ~8 до ~11 кВт/(м²·K).

При високих температурах і високій якості пари спостерігається часткове висихання плівки, що знижує НТС.

Результати є важливими для оптимізації мікроканального охолодження електроніки та інших компактних систем.

- You et al. [4] досліджували кипіння R1233zd(E) у мікроканалах. НТС: (6–18 кВт/(м²·K)), зростають із масовою витратою. R1233zd(E) має нижчий НТС, ніж R134a (15–20 кВт/(м²·K)), але значно нижчий GWP (~6 проти ~1430), що робить його екологічно кращим для компактних теплових систем. Експерименти проводились при температурах насичення від 25°C до 55 °C.
- Dewangan et al. [5] вивчили нуклеаційне кипіння R-134a і R-410A. НТС R-410A вищий на 20–39%. Наприклад, при 30 °C: R-134a – 12,3, R-410A – 16,5 кВт/(м²·K). Зменшення НТС при великих бульбашках. Автори запропонували нову кореляцію для розрахунку НТС. Вона була отримана для обох холодоагентів і в температурному діапазоні від 20 до 50 °C, з точністю прогнозування ±12%.
- Mota-Babiloni et al. [6] порівняли R134a з HFO-1234ze(E) і R-515B у теплових насосах до 95 °C. Незважаючи на зниження потужності на 22–27%, COP був до +5% вищим. GWP знижено до 28%. Обидва агенти сумісні з наявними компресорами. Для розрахунків рекомендовано кореляцію Chen (кипіння, точність ±10–15%) і Shah (конденсація, точність ±10%).

Висновки.

Усі розглянуті фреони відповідають ключовим вимогам для теплоносіїв двофазних систем охолодження. R-515B найбільш універсальний за співвідношенням «ефективність - безпека». R-1233zd(E) і HFO-1234ze(E) дають найкращі показники за GWP і застосовні в мікроканальних випарниках. Підтверджено застосовність HFO-1234ze(E) і R-515B для високотемпературних теплових насосів з високою енергетичною та екологічною ефективністю.

НТС для нових фреонів при кипінні, від 25°C до 55 °C, становлять 4-18 кВт/(м²·K), при конденсації 2-15 кВт/(м²·K), що на 5-15% нижче за R134A, але вони перевершують за екологічністю (GWP <300) та енергоефективністю (COP вище на 5%). Рекомендується адаптувати кореляції Chen і Shah і розширити експерименти для високих теплових потоків.

Для точного проектування систем охолодження рекомендовано застосовувати кореляцію Chen для кипіння з точністю ±10–15%, кореляцію Shah для конденсації з точністю ±10% та нову кореляцію Dewangan et al. з точністю ±12%, адаптовану до нових фреонів.



Перелік посилань

1. Кізіленко, В. В. Використання двофазних контурів теплоперенесення для вирішення задач охолодження потужної електроніки та дата-центрів [Текст] / В. В. Кізіленко, Г. О. Горбенко // Сучасні проблеми двигунобудування, енергетики та інтелектуальної механіки. – 2024. – С 89-90.
2. Universal Direct-to-Chip Cold Plates for Single-and Two-Phase Cooling [Text] / Wang, Qingyang, et al // OCP Global Summit. - 2024
3. Keepaiboon, C. Two-Phase flow patterns and heat transfer characteristics of R134a refrigerant during flow boiling in a single rectangular micro-channel [Text] / C. Keepaiboon, S. Wongwises // Experimental Thermal and Fluid Science. - 2015. - Vol. 66. - P. 36-45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.02.004>
4. Experimental study on flow boiling of refrigerant R1233zd(E) in microchannels: Heat transfer [Text] / C. You, D. Liu, Y. Hua et al. // Applied Thermal Engineering. - 2021. - Vol. 182. – P. 116083. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116083>
5. Pool boiling heat transfer on a plain tube in saturated R-134a and R-410A [Text] / A. K. Dewangan, S. K. Sajjan, A. Kumar, R. Kumar// Heat and Mass Transfer. - 2020. - Vol. 56. – P. 1179–1188. doi: [10.1007/s00231-019-02779-8](https://doi.org/10.1007/s00231-019-02779-8)
6. Experimental comparison of HFO-1234ze(E) and R-515B to replace HFC-134a in heat pump water heaters and moderately high temperature heat pumps» [Text] / A. Mota-Babiloni, C. Mateu-Royo, J. Navarro-Esbrí, Á. Barragán-Cervera // Applied Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 196. – P. 117256 doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117256>

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОНТУРНИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБАХ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

І. М. Гусак

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Контурні теплові труби (КТТ, або loop heat pipes — LHP) є одними з найбільш перспективних пасивних систем відведення тепла, що активно досліджуються для застосування в авіаційній та космічній техніці. Їхня конструкція дозволяє забезпечити ефективний перенос теплоти на значні відстані без використання зовнішніх джерел енергії, що є критично важливим для високонавантажених зон авіаційних двигунів, бортової електроніки та енергетичних блоків. Завдяки здатності до автономної роботи, високій ефективності теплопередачі, компактності та нечутливості до зміни орієнтації в гравітаційному полі, КТТ набули широкого розповсюдження в сучасних теплових системах літальних апаратів [1, 4, 5].

Незважаючи на численні експериментальні і теоретичні дослідження, сучасні моделі КТТ мають низку обмежень. Зокрема, більшість з них базуються на припущеннях про усталені режими роботи, нехтуючи складними теплогидравлічними процесами, що виникають під час запуску, переходу між режимами або при дії змінного теплового навантаження [2, 3, 6]. Значною проблемою також залишається адекватне описання фазових переходів у пористому середовищі випаровувача, впливу температурної неоднорідності, наявності неконденсованих