

О.Л. Марченко, О.М. Пономарьов, О.Г. Левицька

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара***ТЕПЛООБМІН В ТЕПЛОВІЙ ТРУБІ ЗІ ЗМІННИМИ КУТАМИ  
НАХИЛУ ТА ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ**

В статті наведені результати експериментальних досліджень впливу моделювання зовнішніх факторів, таких як вібрації та зміна вектору гравітації на тепломасообмінні процеси всередині теплової труби. Теплові труби знайшли широке застосування як пристрої, що дозволяють передавати значні теплові потоки, для вирішення різноманітних задач в енергетичних установках. Устаткування з використанням теплових труб можна зустріти в теплоенергетичному комплексі, металургії, авіаційній та ракетно-космічній техніці. Всередині теплової труби протікають складні тепломасообмінні процеси кипіння, випаровування, конденсації, руху рідкої фази в пористих або капілярних структурах. Існуючі методики розрахунку та проектування часто мають рекомендаційний характер. Складність процесів роботи теплових труб спонукає вчених в галузі тепломасообміну до подальших наукових досліджень. В даній роботі проводиться серія експериментальних досліджень щодо моделювання робочих процесів в середині теплових труб, а саме вплив вібрацій та куту нахилу на інтенсивність теплообміну. Дана робота представляє собою узагальнення експериментальних даних щодо дослідження впливу вібрацій та кута нахилу на характеристики теплових труб.

*Ключові слова:* теплові труби, теплообмін, тепломасообмін, вібрації, енергетика.

The article presents the results of experimental studies of the influence of modeling of external factors, such as vibrations and changes in the gravity vector, on the heat and mass transfer processes inside the heat pipe. Heat pipes are widely used as devices that allow the transfer of significant heat flows to solve various problems in power plants. Equipment using heat pipes can be found in the thermal power complex, metallurgy, aviation and rocket and space technology. Complex heat-mass exchange processes of boiling, evaporation, condensation, movement of the liquid phase in porous or capillary structure take place inside the heat pipe. Existing methods of calculation and design are often of a recommendatory nature. The complexity of heat pipe work processes prompts scientists in the field of heat and mass transfer to further scientific research. In this work, a series of experimental studies is conducted on the modeling of work processes in the middle of heat pipes, namely the influence of vibrations and the angle of inclination on the intensity of heat exchange. This work is a generalization of experimental data on the study of the influence of vibrations and the angle of inclination on the characteristics of heat pipes.

*Keywords:* heat pipes, heat transfer, heat and mass transfer, vibrations, energetics

**Вступ.** Теплові труби (ТТ) знайшли широке застосування як пристрої, що дозволяють передавати значні теплові потоки які в сотні та тисячі разів більше, ніж у широко вживаних конструкційних матеріалів з великим коефіцієнтом теплопровідності.

В ракетно-космічній техніці ТТ можуть використовуватись для стабілізації температури корпусів супутників, відводу тепла від стінок каналів камери згоряння, електронних та оптичних приладів. В енергетиці для відводу енергії з активної зони реактора, охолодження камери МГД генератора. В металургійній промисловості для вирівнювання температурних полів фурм доменних печей, тощо.

Всередині теплової труби протікають складні тепломасообмінні процеси кипіння, випаровування, конденсації, руху рідкої фази в пористих або капілярних структурах, тому існуючі методики розрахунку та проектування часто мають рекомендаційний характера теплові труби є об'єктом подальших наукових досліджень. Також на роботу теплових труб впливають умови експлуатації. Оскільки конвекція відбувається в полі масових сил, то режим роботи теплової труби, встановленої, наприклад, на літальному апараті який рухається з величезним прискоренням або здійснює необхідний маневр, істотно відрізнятиметься від режиму роботи на Землі.

З іншого боку у зв'язку з низкою чинників, які мають місце під час роботи технічного пристрою, практично неминуча наявність коливань та вібрацій. У попередніх роботах [2-4] експериментально показано, що вібрації значно впливають на процеси кипіння, гідродинамічну картину течії двофазного теплоносія, гідравлічний опір двофазного потоку, динаміку протікання процесу. Тому абсолютно логічним є припущення що вищезгадані явища будуть впливати на роботу теплової труби.

**Постановка задачі.** Задачі дослідження теплових процесів дуже важливі в різних галузях промисловості. Ці процеси відрізняються складністю та не підлягають описанню стандартними математичними засобами. Експериментальні роботи з застосуванням фізичного моделювання дозволяють дещо розширити уявлення про характер теплообміну. Дана робота представляє собою узагальнення експериментальних даних щодо дослідження впливу вібрацій та кута нахилу на характеристики теплових труб.

**Рішення задачі.** Експериментальна установка та методика проведення експерименту. Експериментальна установка створена на базі електро-вібростенду [1], на робочому столі якого розташована досліджувана теплова труба. Кріплення виконано з можливістю нахилу ТТ у вертикальній площині на певний градус. За нульовий кут повороту прийнято вертикальне розташування, при цьому ділянка підводу тепла знаходиться внизу.

Об'єктом дослідження є теплова труба, діаметром 20 мм, довжиною 590 мм. Робоче тіло – вода, матеріал стінок – нержавіюча сталь, гніт виготовлено з металеві сітки. Довжина нагрівальної ділянки 105 мм. По довжині ТТ встановлено 5 термопар. Перша - безпосередньо під нагрівачем і чотири рівномірно по довжині ділянки, що охолоджується. Точність вимірювального приладу  $\pm 3^\circ\text{C}$ . Охолоджувана ділянка має безпосередній контакт із

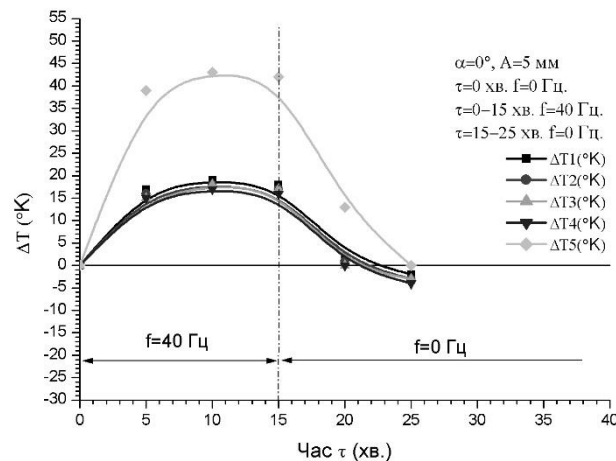
навколишнім середовищем, теплообмін здійснюється за рахунок конвекції та випромінювання.

Кожна серія експериментів проводиться за постійних параметрів: кут нахилу  $\alpha^\circ$ , температура навколишнього середовища  $T_{\text{навк.сер.}}$ , електрична потужність  $P$  [Вт], частота вібрацій  $f$  [Гц], амплітуда коливань  $A$  [мм].

Методика проведення експерименту полягала в наступному: після подачі напруги на нагрівальний елемент протягом певного часу відбувався вихід ТТ на сталий тепловий режим без вібрацій, потім вмикались вібрації і продовжувався вихід на сталий тепловий режим з вібраціями, після цього вібрації вимикалися і відбувалося повернення на стаціонарний режим без вібрацій. Після вмикання вібрацій показання термопар фіксувалися через певні проміжки часу  $\tau$  [хв] та заносилися до таблиці.

Результати експериментів у різницевому  $\Delta T_i$  та відносному  $T_i/T_{i0}$  вигляді показані на графіках рис. 1 – 8 для кожного кута нахилу, де  $\Delta T_i$  [°К] – різниця між температурою стінки без вібрацій та за наявності вібрацій, а  $T_i/T_{i0}$  – відношення температури стінки за наявності вібрацій до температури стінки ТТ без вібрацій ( $i$  – номер термопари). В роботі представлені данні для кутів нахилу  $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  та  $135^\circ$ . За табличними даними побудовані залежності різницевої та відносної температури від часу.

У всіх експериментах:  $T_{\text{навк.сер.}} = 25^\circ\text{C}$ , потужність  $P = 85$  Вт, питомий тепловий потік  $q_{\text{пит.}} = 2578101$  Вт/м<sup>2</sup>, частота  $f = 40$  Гц, амплітуда  $A = 5$  мм.



**Рис. 1. Зміна температури стінки ТТ при впливі вібрацій для  $\alpha = 0^\circ$**

Як видно із графіку рис.1 за наявності вібрацій спостерігається зменшення температури стінки ТТ. Це відбувається не миттєво, а протягом певного часу і становить 10–15 хв. Кут нахилу ТТ у цьому експерименті  $\alpha = 0^\circ$ . Оскільки при накладанні зовнішнього вібровпливу температура стінки зменшується, то  $\Delta T$  виходить додатною. Вібрації вмикаються при  $\tau = 0$  хв., і витримуються до настання стаціонарного теплового режиму. На даному графіку можна спостерігати динаміку зміни  $\Delta T$ . Після вимкнення вібрацій

температура стінки починає повертатися до початкового значення, тобто  $\Delta T$  та прямує до нуля. Від’ємні значення  $\Delta T$  свідчать про наявність гістерезису у цьому процесі, тобто після вимкнення вібрацій температура стінки стає вищою за початкову. На це явище слід звернути особливу увагу, оскільки при значних теплових навантаженнях це може стати причиною нерозрахункового режиму. Іншим, вартим уваги, фактором є тепловий режим периферійної ділянки, де встановлена термопара T5, тут вплив вібрацій має максимальний ефект. Падіння температури стінки у згадуваному експерименті становить від 16–19°C до 43°C на периферійній ділянці.

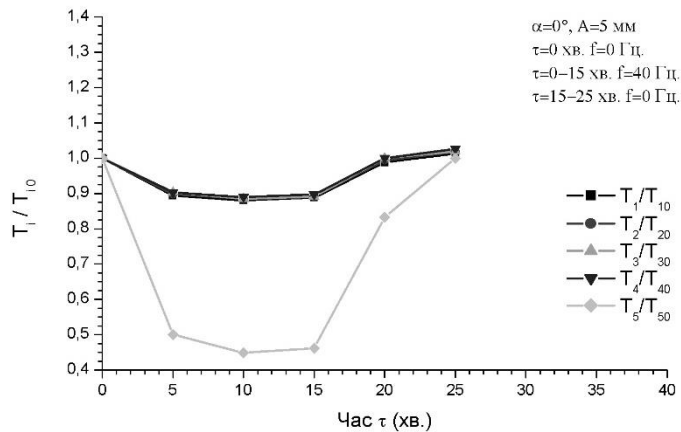


Рис. 2. Відносна зміна температури стінки TT при дії вібрацій для  $\alpha = 0^\circ$

На графіку рис.2 показано динаміку зміни температури стінки в тому ж експерименті. Відносна температура визначалася як відношення температури на режимі, що встановився, за наявності вібрацій до температури в тій же точці до включення вібрацій. Відносне падіння температури становить 11–12% за основною довжиною та до 56% на периферії.

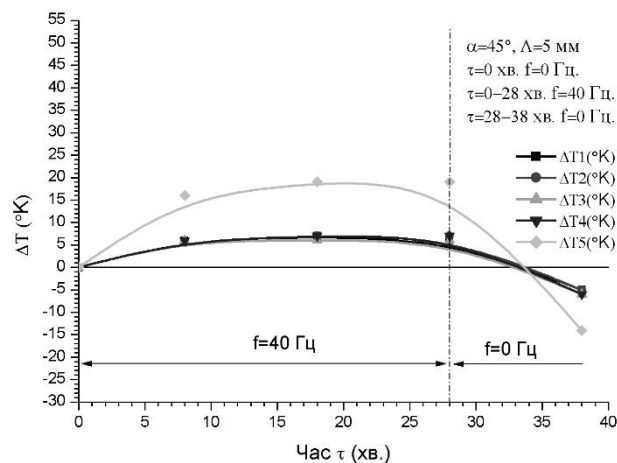


Рис. 3. Зміна температури стінки TT при дії вібрацій для  $\alpha = 45^\circ$

Зміна температури стінки в динаміці при вібродії для кута нахилу  $\alpha=45^\circ$ , Рис. 3, досягає 6–7°C по основній довжині та 19°C периферії, що становить 0,038–0,045 до 0,26 від початкової температури – рис. 4. Як і в попередньому експерименті спостерігається гістерезис до 14°C.

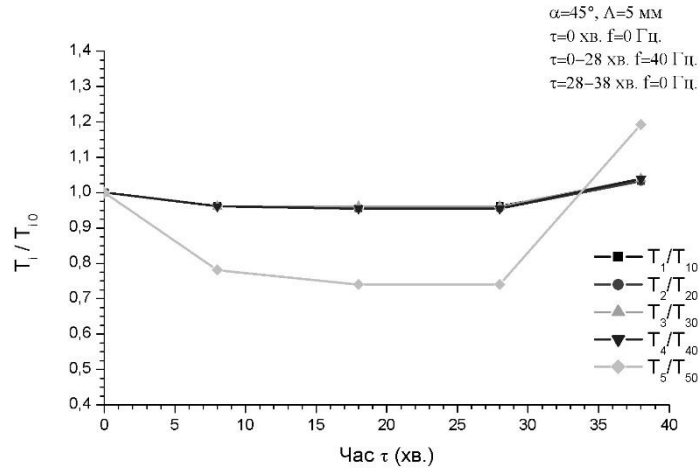


Рис. 4. Відносна зміна температури стінки TT при дії вібрацій для  $\alpha=45^\circ$

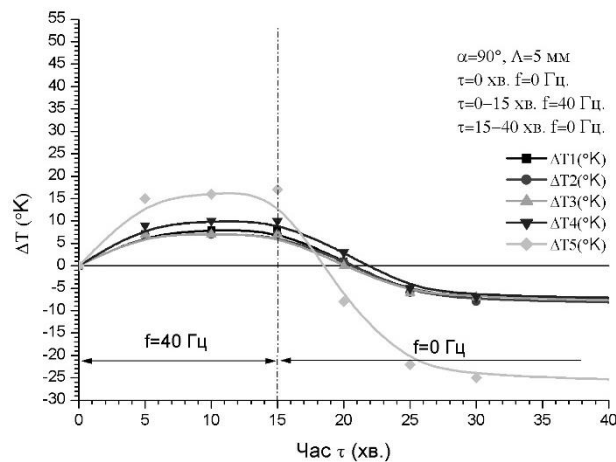
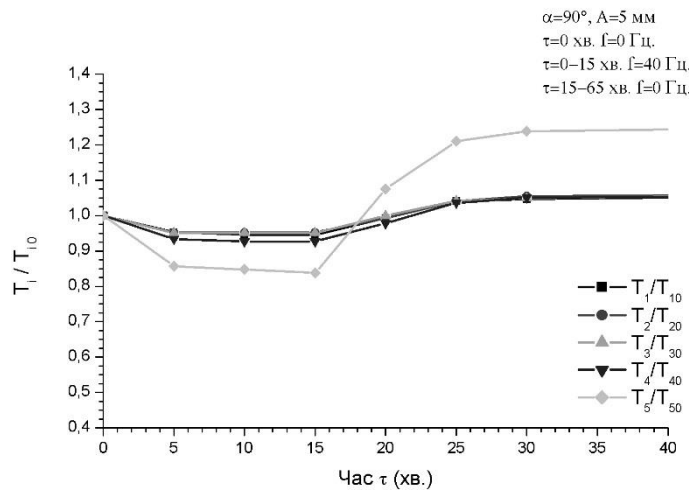


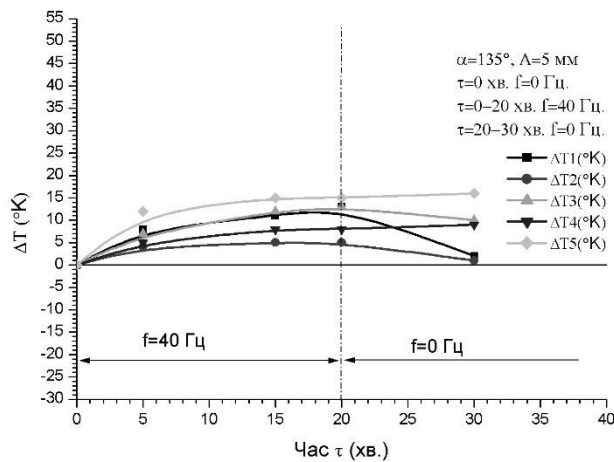
Рис. 5. Зміна температури стінки TT при дії вібрацій для  $\alpha=90^\circ$

При горизонтальному розташуванні TT ( $\alpha=90^\circ$ ) падіння температури стінки становить від 7–10°C до 17°C рис. 5.



**Рис. 6.** Відносна зміна температури стінки ТТ при дії вібрацій для  $\alpha = 90^\circ$

Відносна зміна температури при вібраціях становить 0,048–0,162 від початкової, що в динаміці показано на графіку рис.6.



**Рис. 7.** Зміна температури стінки ТТ при дії вібрацій для  $\alpha = 135^\circ$

При куті нахилу  $\alpha=135^\circ$  розподіл зміни температури більш рівномірний, ніж у попередніх випадках рис.7. Зазначимо, що при даному куті нахилу значно погіршуються характеристики ТТ. Дане явище можна пояснити таким чином – при кутах повороту більше  $90^\circ$  зона випаровування (підведення тепла) виявляється вище за зону конденсації, пароподібне робоче тіло за рахунок конвекції спрямовується вгору, а рідка фаза збирається вниз, при цьому ТТ перестає працювати як пристрій. Про те що рідка фаза збирається вниз, можна судити за показаннями периферійних термопар Т4 та Т5. З графіка видно, що

після вимкнення вібрацій температури у цих точках продовжують зменшуватися. Можна дійти висновку, що на двофазний потік вплив вібрацій більш істотний ніж на однофазний.

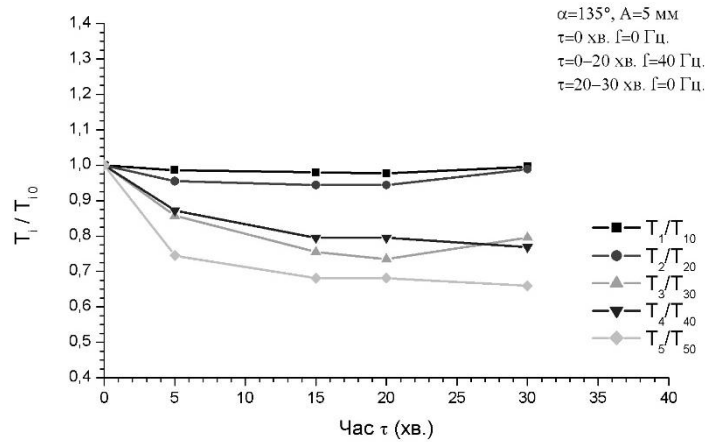


Рис. 8. Відносна зміна температури стінки ТТ при дії вібрацій для  $\alpha = 135^\circ$

З точки зору застосування ТТ на пристроях, що змінюють своє положення відносно вектору гравітаційних сил, режим експлуатації при кутах нахилу більше  $90^\circ$  є небезпечним, оскільки теплопровідність значно погіршується.

Відносна зміна температури на режимі  $\alpha = 135^\circ$  становить 0,02–0,32, рис.8. Узагальнені результати представлені на графіках рис. 9–11.

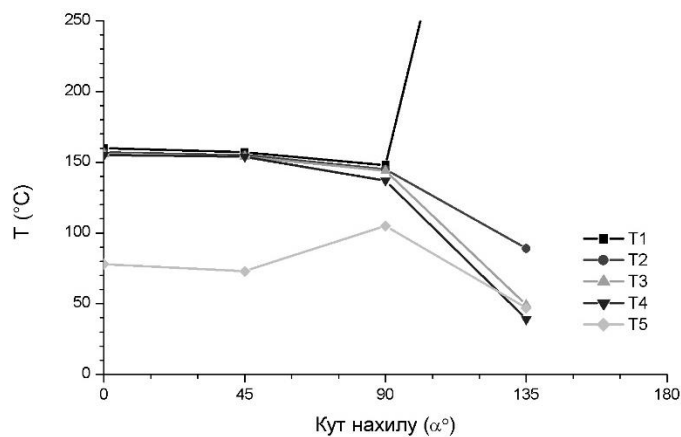


Рис. 9. Графік абсолютної температури стінки ТТ без впливу вібрацій для різних кутів нахилу

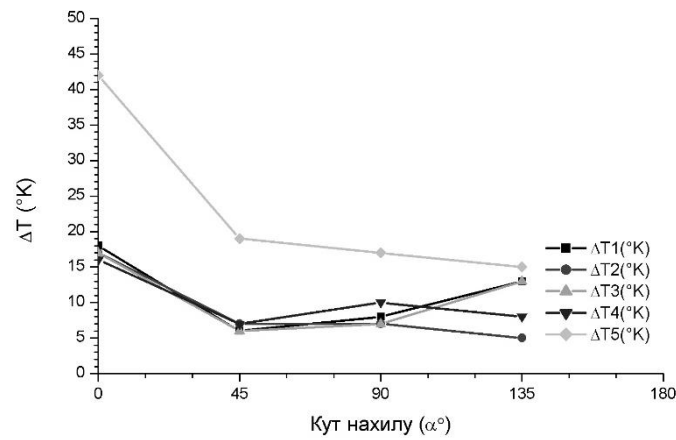


Рис. 10. Графік різницевої температури стінки ТТ при дії вібрацій для різних кутів нахилу

На Рис. 10 представлений узагальнений графік різницевої температури  $\Delta T$  між температурою стінки при вібраціях і без вібрацій на сталих режимах і для різних кутів нахилу.

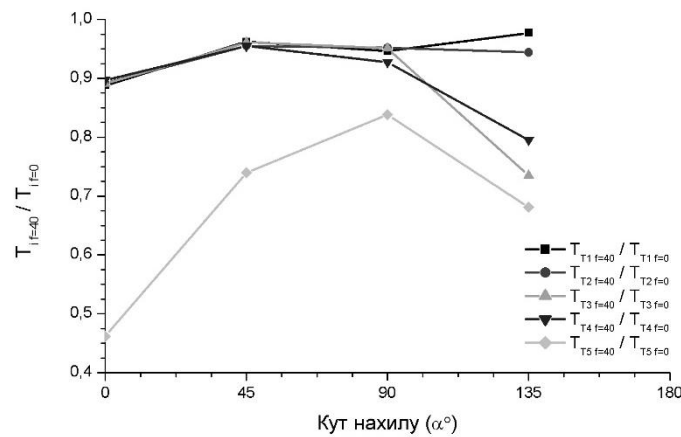


Рис. 11. Графік відносної температури стінки на режимі для різних кутів нахилу

**Висновки.** Аналіз експериментальних даних показує, що вплив вібрацій і кута повороту значно впливає на протікання тепломасообмінних процесів в тепловій трубі, також спостерігається спільний вплив вищезгаданих факторів.

Наявність вібрацій покращує теплообмін. Цей факт чітко видно на графіках рис.1–11. За наявності вібровпливу температура стінки по всій



довжині ТТ зменшується від 0,04 до 0,56, особливо на віддаленій від нагрівача термопарі.

Вплив кута повороту без наявності вібрацій показано на графіку рис. 9 і полягає в наступному – найкращим з погляду теплообміну слід вважати вертикальне розташування ТТ з підводом тепла знизу. В експериментальних даних цей кут  $\alpha=0^\circ$ . Найгіршим є вертикальне розташування при підведенні тепла зверху  $\alpha=180^\circ$ . Експерименти при кутах більших  $180^\circ$  не проводилися, оскільки спостерігалось надмірне підвищення температури в районі нагрівача, і існувала ймовірність виходу з ладу ТТ. Проміжні положення кута впливають на теплообмін нелінійно. У проміжку від  $\alpha=0^\circ$  до  $\alpha=90^\circ$  значних змін немає, але при кутах більше  $\alpha=90^\circ$  настає різке погіршення теплообміну, температура в районі нагрівача стрімко зростає а по довжині – падає.

Спільний вплив вібрацій та кута повороту показано на рис.10–11. Як видно з графіків при  $\alpha=0^\circ$  вібродії проявляють найбільший вплив, при  $\alpha=0-45^\circ$  ефекти можна охарактеризувати, як проміжні, при кутах  $\alpha=45-90^\circ$  спостерігається незначний вклад вібрацій, який виглядає по різному для різних ділянок труби.

Отримані висновки узгоджуються з отриманими раніше [2–4], у яких спостерігалася інтенсифікація тепломасообмінних процесів з вібраціями при кипінні у великому обсязі, вимушеному перебігу неадіабатного двофазного потоку.

Високі енергетичні характеристики, а також надійність та безвідмовність виробів ракетно-космічної техніки є важливими факторами для розробки та експериментального відпрацювання нових агрегатів та систем [5–7]. Роботи по проведенню експериментальних досліджень процесів щодо інтенсифікації тепломасообміну, динаміки та вібраційних процесів в виробках ракетно-космічної техніки є актуальними та корисними, та можуть використовуватись як науковцями, так і виробничими підрозділами, а також в освітньому процесі.

## Бібліографічні посилання

1. Присняков К.В., Марченко О.Л., Габринец В.А. Экспериментальный стенд для исследования процессов теплообмена в условиях вибронагрузок. Проблемы высокотемпературной техники: Сборник научных трудов. – Днепропетровск, ДДУ 1996. – С. 25-31.

2. В. Присняков, С. Бондаренко, В. Луценко, Ю. Николаенко, К. Присняков, В. Штангеев, В. Елисеев Тепломассообмен и вибрация – Київ, Наукова думка, 2001.

3. K. Prisniakov, Yu. Nikolaenko, O. Marchenko, V. Kravetz, V. Prisniakov. About Complex Influence of Vibrations and Gravitational Fields on Serviceability of Heat Pipes in Composition of the Space-Rocket Systems Paper-Nr. : IAC-03-I.1.10. 54th International Astronautically Congress. Bremen, Germany. September 29-October 3, 2003; <http://www.aiaa.org/iaf2003>. Tracking Number: 16490

4. K. Prisniakov, O. Marchenko, Yu. Melikaev, Yu. Nikolaenko, V. Prisniakov. About Functioning of the Heat Pipe in Condition of Gravity and Vibration. Paper C-1. 7th International Heat Pipe Symposium. October 12 - 16, 2003. Seogwipo KAL Hotel, Jeju-DO, Korea. 9 p.

5. Габринец В.А., Марченко О.Л. Влияние вибраций на гидродинамические процессы двухфазного потока в трактах ЖРД. Проблемы высокотемпературной техники: Сб.науч.тр. Дніпропетровськ, Акцент ПП, 2014. С.37–42.

6. Катренко, М. О., Бондаренко, С. Г., Сосновська, О. В., Золотько, О. Є., Марченко, О. Л., Подольчак, С. М. (2018). Перспективні напрямки наукових досліджень на кафедрі двигунобудування. Journal of Rocket-SpaceTechnology, 26(4), С. 45-54.

7. Пономарьов О. М. Наземне експериментальне відпрацювання елементів автоматики пневмогідравлічних систем ракетно-космічної техніки / О. М. Пономарьов // Вісник Дніпровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка». – Дніпро. – 2019. – Вип. 22, №4, Том 27. – С. 58–61. <https://doi.org/10.15421/451909>.

*Надійшла до редколегії 16.09.2022*