

Є. Е. РОГОВИЙ, Р. Ю. ТУРНА

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний університет», Харків, Україна***ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОПЛАТИ НА ГІСТЕРЕЗИС  
ЗА ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

У двофазних контурах теплоперенесення систем забезпечення теплового режиму наземного і космічного застосування використовують термоплати - контактні теплообмінники, призначені для відведення тепла від охолоджуванних пристроїв. Після увімкнення приладу можливий його аномальний перегрів у процесі виходу на стаціонарний режим роботи. Перегрів пов'язаний із явищем гістерезису за тепловим навантаженням під час початку кипіння, тобто переходу від однофазної конвекції до розвиненого кипіння у випарнику термоплати. **Метою** роботи було вивчення впливу конструктивних параметрів термоплат на явище гістерезису на інтегральному рівні. Для цього було реалізовано методологію випробувань термоплат, що містять експерименти за повільного (квазістаціонарного) і швидкого розігрівання після ввімкнення приладу відразу на повну потужність. Перегрів приладу можливий як за «повільного», так і за «швидкого» розігріву. Максимальний перегрів у виконаних експериментах був ~18K. Такий перегрів може становити небезпеку для надійності приладу. Дослідження виконано з аміаком в якості теплоносія на 5-ти моделях термоплат, що відрізняються шорсткістю каналу випарника, довжиною і матеріалом, позовжньою теплопровідністю, теплоємністю конструкції тощо. Небезпека перегріву приладу також визначається максимальним тепловим навантаженням, за якого експлуатується прилад. Сформульовано наступні **висновки**: – найбільший вплив на параметри гістерезису має величина шорсткості поверхні каналу випарника. У разі збільшення шорсткості знижується небезпека перегрівання приладу, змінюється також характер «кривих кипіння» в термоплаті; – збільшення довжини і позовжньої теплопровідності сприятливо позначається на зменшенні небезпеки перегріву приладу; – виконання поверхні випарника з алюмінієвого сплаву замість неіржавної сталі унеможливує гістерезис; – у разі швидкого розігріву термоплати неоднозначний вплив має максимальний тепловий потік на стаціонарному режимі: з його зростанням перегрівання внаслідок гістерезису спочатку збільшується, а в разі подальшого підвищення - зменшується і може зникнути взагалі. Значне підвищення максимального теплового потоку порівняно з тепловим потоком початку кипіння знижує небезпеку впливу гістерезису на перегрів приладу. **Результати** даної роботи дають рекомендації, як уникнути небезпечного перегріву приладу внаслідок явища гістерезису.

**Ключові слова:** термоплата; конструкція; контур теплоперенесення з двофазним теплоносієм; початок кипіння; гістерезис за тепловим навантаженням; аміак; надійність приладу.

**Вступ**

Ключовим елементом контурів теплоперенесення з двофазним теплоносієм (ДФК) систем забезпечення теплового режиму (СЗТР) наземного і космічного застосування є термоплати - контактні теплообмінники, призначені для відведення тепла від пристроїв, які охолоджуються [1]. Основний штатний режим роботи термоплати відповідає теплообміну при розвиненому кипінні. Але при увімкненні охолоджуваного приладу можливий його аномальний перегрів у процесі виходу на стаціонарний режим. Перегрів пов'язаний з явищем гістерезису за тепловим навантаженням при переході від однофазної конвекції до розвиненого кипіння [2]. Наразі вивчення явища гістерезису зосереджено на аналізі проблеми на локальному рівні. В роботі [3] проаналізований сучасний стан вивчення явища: які

чинники впливають на дане явище на локальному рівні та показано, що явище гістерезису існує на інтегральному рівні, тобто на рівні температури приладу. Здебільшого чинники які впливають на гістерезис на рівні приладу ті самі що й за локального теплообміну. Попри це, робіт направлених на вивчення гістерезису за тепловим навантаженням саме на інтегральному рівні недостатньо для належного урахування проблеми при проектуванні СЗТР.

Параметри гістерезису (критична щільність теплового потоку, перегрів приладу) залежать від режимних параметрів потоку теплоносія та конструктивних параметрів. До режимних параметрів належать: масова витрата, недогрів рідини на вході та тиск (температура насичення). До конструктивних параметрів належать: шорсткість [4], форма та розміри каналу [5], контактний кут змочування, який залежить від фізичних властивостей пари теплоно-

сій-матеріал поверхні [6]. Крім цього на інтегральному рівні з'являються й наступні конструктивні параметри: теплоємність конструкції, повздовжня теплопровідність, довжина каналу термоплати. Перегрів приладу внаслідок явища гістерезису становить небезпеку з погляду надійності його експлуатації.

Метою цієї роботи було вивчення впливу конструктивних параметрів термоплати на параметри гістерезису на інтегральному (системному) рівні, на небезпеку перегріву приладу після його ввімкнення в процесі виходу на стаціонарний режим роботи. Експерименти виконано на аміаку в діапазоні параметрів, характерних для СЗТР безлюдних стаціонарних супутників.

### 1. Експериментальний стенд

Схема експериментального стенду зображена на рис. 1. Він включає: помпу, гілку випарників-термоплат, конденсатор, гідроакумулятор із тепловим регулюванням (ТГА). Помпа пропонує теплоносії (аміак) по контуру. Перед входом у випарник теплоносії догрівається до необхідної температури за допомогою переднагрівача. У термоплатах до теплоносія підводиться тепло і він частково випаровується. Двофазний потік тече в конденсатор, де конденсується і охолоджується гліколем.

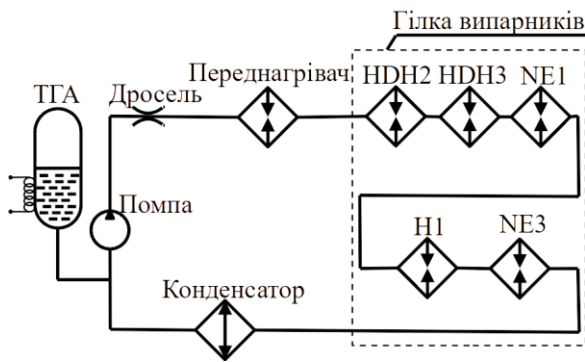


Рис. 1 - Схема експериментального стенда

Вимірювали витрату теплоносія  $m$ , тиск аміаку в ТГА  $P_{НСА}$ , потужність нагрівачів  $Q$ , температури потоків аміаку й антифризу вздовж гілок, температури на поверхні термоплат, конденсатора тощо.

### 2. Експериментальні термоплати

Експерименти виконано на п'яти моделях термоплат, що відрізняються довжиною, матеріалом і шорсткістю стінки каналу випарника, способом підведення тепла, поздовжньою теплопровідністю тощо.

В табл. 1 наведено основні параметри термоплат.

Таблиця 1  
Основні параметри термоплат

Термоплата	H1	NE3	NE1	HDH2	HDH3
L, мм	98	370	370	150	150
F <sub>d</sub> , см <sup>2</sup>	21,6	81,3	81,3	33	32,5
C, Дж/К	287,2	1621,6	2433,3	886,7	882,9
λF, (Вт·м)/К	0,2	1,6	2,2	0,67	0,64
Q <sub>max</sub> , Вт	184	520	520	330	377
q <sub>max</sub> , Вт/см <sup>2</sup>	8,5	6,4	6,4	10,0	11,6
R <sub>H</sub> , К/Вт	0,182	0,027	0,016	-	0,057
Ra, мкм	0,12	0,12	1,7	1,7	3,33

Позначення у таблиці: L – довжина термоплати; F<sub>d</sub> – площа тепловіддавальної поверхні випарника; C – повна теплоємність термоплати; λF = Σ(λ·F<sub>d</sub>) – повна поздовжня теплопровідність конструкції, де λ – теплопровідність, Q<sub>max</sub> – максимальна потужність нагрівача; q<sub>max</sub> = Q<sub>max</sub>/F<sub>d</sub> – максимальний питомий тепловий потік через поверхню випарника; R<sub>H</sub> – термічний опір корпусу термоплати; Ra – шорсткість.

Ескіз поперечного перерізу термоплати H1 наведено на рис. 2.

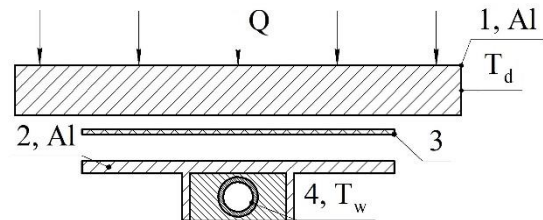


Рис. 2. Поперечний переріз термоплати з одностороннім верхнім підведенням тепла (H1): 1 – імітатор приладу; 2 – корпус термоплати; 3 – пластина граффлекса; 4 – канал випарника

Модель термоплати H1 складається з двох тіл: імітатора нагрівача (приладу) 1 і корпусу термоплати 2, з'єднаних через теплопровідну пластину граффлекса 3 (див. рис. 1). Імітатор приладу виконаний у вигляді алюмінієвої пластини з високою теплопровідністю, що давало змогу вважати поле температур у ньому однорідним. Зверху імітатора підводилася теплова потужність Q. У корпусі термоплати T-подібного профілю є циліндричний канал випарника 4, який виконаний з трубки 8x0,5 і залитий теплопровідним припоєм.

Фото термоплат наведено на рис. 3. Термоплата NE3 має аналогічну конструкцію, але має суттєво більшу довжину. Імітатор має більшу поздовжню теплопровідність.

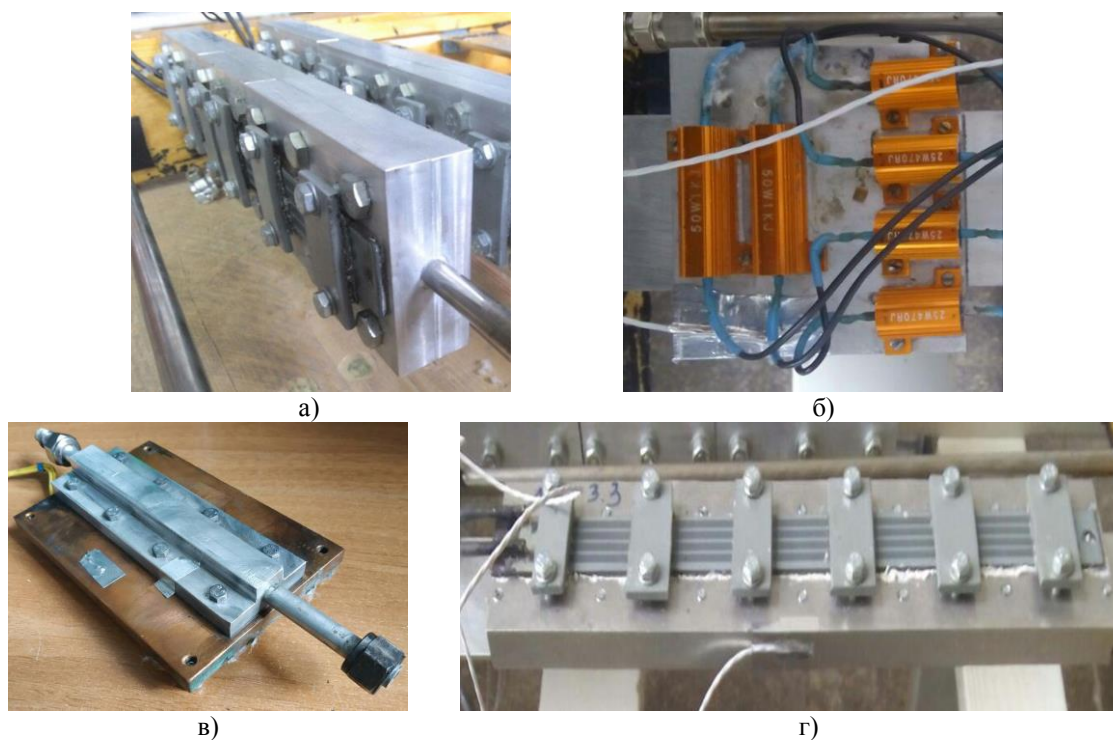


Рис. 3. Фото термоплат: а) NE1; б) H1; в) HDH3; г) NE3

Конструкція термоплати HDH2 аналогічна H1, але алюмінієвий корпус масивніший, а імітатор приладу виконаний з мідної пластини. Канал випарника HDH2 виконаний з трубки 10x1,5 і поміщений безпосередньо в алюмінієвий корпус термоплати. Термоплата HDH3 ідентична HDH2, але канал діаметром 6,9 мм утворений свердлінням в алюмінієвому корпусі. Діаметр каналу випарника у всіх інших термоплат - 7 мм.

Шорсткість поверхні каналу випарника  $R_a$  в термоплатах різна. Найменша шорсткість – у термоплатах H1 і NE3. Найбільша – у термоплаті HDH3. Матеріал поверхні випарників усіх термоплат – неіржавійна сталь, крім HDH3 – алюміній.

Канал випарника термоплати NE1 (рис. 4) виконаний з трубки 10x1,5 і затиснутий між двома алюмінієвими пластинами імітатора через теплопровідну пасту. Імітатор має найбільшу поздовжню теплопровідність з усіх термоплат. Теплопідведення в цій термоплаті здійснюється більш рівномірно по всьому периметру каналу випарника.

На рис. 4 наведено ескіз поперечного перерізу термоплати NE1.

### 3. Методика проведення і оброблення експериментів

Розглянемо основні положення методики проведення і оброблення експериментів на прикладі термоплати H1 (див. рис. 2).

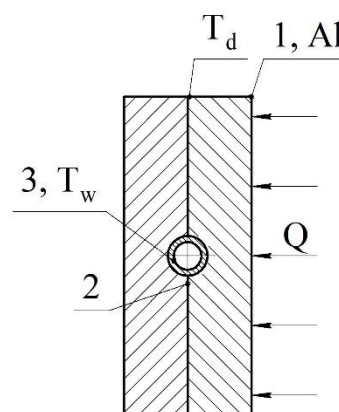


Рис. 4. Поперечний переріз термоплати з двостороннім бічним підведенням тепла (NE1): 1 – імітатор приладу; 2 – корпус термоплати; 3 – пластина граффлекса; 4 – канал випарника

На вхід у термоплату подавався аміак із заданими тиском  $P_{НСА}$ , масовою витратою  $m$ , температурою  $T_{in}$  (або із заданим паровмістом  $x_{in}$ ). Також вимірювалася потужність нагрівача термоплати  $Q$ , температура теплоносія на виході з термоплати  $T_{ex}$ , температура на поверхні імітатора приладу  $T_d$  в одному або декількох перетинах по довжині термоплати. Гілка випарників і конденсатор мали невисокий гідравлічний опір, що давало змогу вважати тиск і температуру насичення в термоплатах і в ТГА приблизно однаковими.

Фізичне явище гістерезису повністю визначається процесами тепловіддачі на поверхні випарни-

ка. Тому температура стінки випарника  $T_w$  є найбільш інформативною з точки зору вивчення явища. Цю температуру не вимірювали, але її можна обчислити на стаціонарних режимах розвиненого кипіння за рівнянням тепловіддачі:

$$T_w = T_d - qF_d R_H, \quad (1)$$

де  $T_d$  – температура імітатора нагрівача, К;

$q$  – середній тепловий потік поверхнею випарника, Вт/м<sup>2</sup>;

$F_d$  – площа тепловіддавальної поверхні випарника, м<sup>2</sup>;

$R_H$  – термічний опір конструкції термоплати, що визначався розрахунковим шляхом з використанням ПК «SolidWorks» та верифікувався в тестових експериментах, К/Вт.

$T_w$  – середня температура стінки каналу випарника (рис. 1), К;

Середній тепловий потік поверхнею випарника визначається за наступною формулою:

$$q = h(T_w - T_{sat}), \quad (2)$$

де  $h$  – середній коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T_{sat}$  – температура насичення, К.

Оскільки явище гістерезису ми розглядали на інтегральному рівні, то ми оперуємо середніми значеннями цих параметрів по всій поверхні каналу випарника. Реальний розподіл локальних параметрів  $q$ ,  $T_w$  і  $h$  по довжині та периметру каналу змінний.

Через те, що поздовжня теплопровідність корпусу термоплати та імітатора нагрівача висока, то в короткій термоплаті Н1 термічний стан імітатора можна характеризувати однією температурою  $T_d$ . В інших термоплатах температура може істотно змінюватися по довжині, тому її вимірювали в трьох перетинах по довжині.

Формули (1) і (2) можна використовувати і для визначення середнього експериментального коефіцієнта тепловіддачі на стаціонарному режимі:

$$h_{exp} = \frac{q}{T_d - qF_d R_H - T_{sat}}. \quad (3)$$

Коли по всій поверхні каналу випарника розвинене кипіння, то коефіцієнт тепловіддачі може бути розрахований за формулою Купріянової [7]:

$$h_{cal} = 2,2P^{0,21}q^{0,7}. \quad (4)$$

У формулі (4) використовуються наступні розмірності:  $h$  – Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $q$  – Вт/м<sup>2</sup>,  $P$  – бар.

Експерименти виконувалися за двома сценаріями.

Сценарій 1 – повільний розігрів термоплати. Використано методику, що ґрунтується на побудові класичних «кривих кипіння» (функцій  $T_w$  і  $T_d = f(q)$ ) при підвищенні та зниженні теплового навантаження. Аналогічну методику використовують інші автори для дослідження гістерезису тепловіддачі на локальному рівні як під час кипіння у великому об'ємі, так і під час течії в каналі [8, 9]. За незмінних параметрів потоку на вході в термоплату фіксували температури імітатора нагрівача  $T_d$  при повільному ступінчастому підвищенні теплового навантаження від нульового до максимального  $Q_{max}$  і з подальшим ступінчастим зниженням до нуля. Цей сценарій приблизно відповідає квазістаціонарному розігріву реальної термоплати з великим значенням параметра  $C/Q_{max}$ . У цих експериментах умови однозначності містили три параметри: температура насичення  $T_{sat}$  (за тиском  $P_{HCA}$ ); недогрів рідини на вході в термоплату до температури насичення  $\Delta T_{sub}$ ; масова витрата теплоносія  $m$ .

Сценарій 2 – теплове навантаження вмикали відразу на максимальну потужність  $Q_{max}$ . Визначалася динаміка зміни температур. Цей сценарій відповідає розігріву реальної термоплати після ввімкнення навантаження на повну потужність. Після досягнення стаціонарного стану теплове навантаження вимикалося. На стаціонарному режимі максимальний тепловий потік через стінку каналу випарника  $q = q_{max} = Q_{max}/F_d$ . У цих експериментах умови однозначності додатково включали четвертий параметр – максимальний тепловий потік  $q_{max}$ .

Експерименти виконано на термоплатах різної конструкції в діапазоні параметрів, характерних для безлюдних КА:

– температура насичення (за тиском  $P_{HCA}$ )  $T_{sat} = 35 \dots 55$  °С;

– недогрів рідини на вході в термоплату до температури насичення  $\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_{in} = 0 \dots 11$  К;

– масовий паровміст потоку на вході  $x_{ex} = 0 \dots 0,1$ ;

– масова витрата теплоносія  $m = 0,5 \dots 7,5$  г/с;

– масова швидкість  $\rho w \approx 12 \dots 200$  кг/(с·м<sup>2</sup>);

– середня щільність теплового потоку в розрахунку на одиницю поверхні каналу  $q = Q/F_d = 0 \dots 12$  Вт/см<sup>2</sup>.

Частина експериментів було проведено за наявності двофазного потоку на вході в канал.

## 4. Результати експериментів

### 4.1. Експерименти з термоплатою Н1

На рис. 5 наведено графік зміни в часі теплового потоку  $q$ , і температур  $T_d$ ,  $T_{sat}$ ,  $T_{in}$ ,  $T_{ex}$  одного з

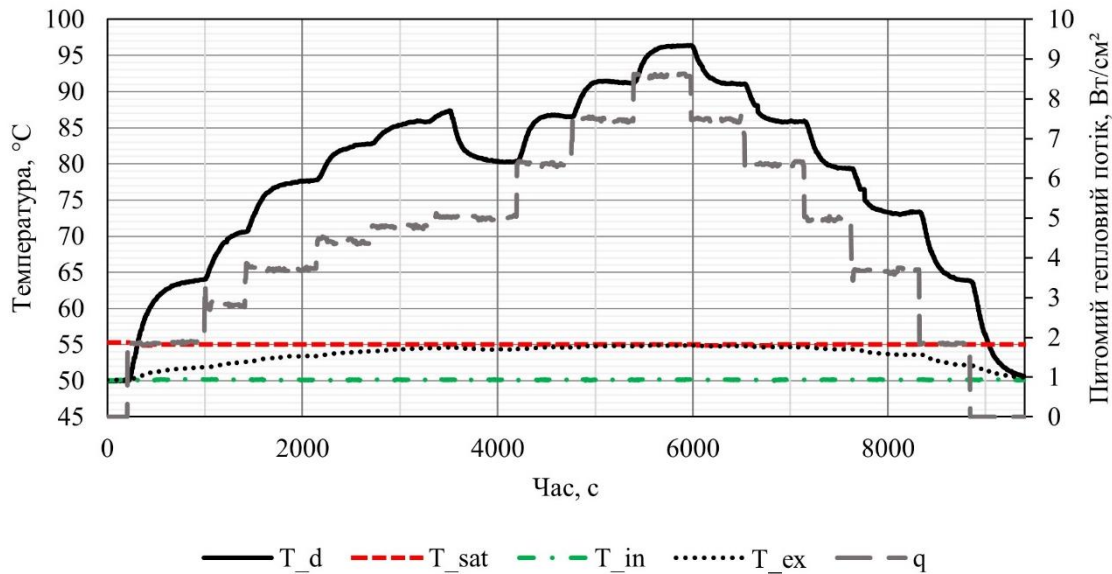


Рис. 5. Експеримент за сценарієм 1 на термполаті Н1.  
 Умови однозначності та основні характеристики теплового потоку:  
 $T_{\text{sat}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{sub}} = 5 \text{ K}$ ,  $m = 4,5 \text{ г/с}$ ,  $q_{\text{ONB}} = q_{\text{cr}} \approx 4,9 \text{ Вт/см}^2$ ,  $q_{\text{max}} \approx 8,4 \text{ Вт/см}^2$

експериментів за сценарієм 1 із термполатою Н1.

Середній тепловий потік  $q$  поступово підвищувався до максимального  $q_{\text{max}}$ , а потім поступово знижувався до нульового. Після кожної зміни  $q$  система витримувалася деякий час для досягнення стаціонарного стану. Графік температур  $T_d$  має горизонтальні «полиці», тепловий потік на яких під час підвищення і зниження теплового навантаження був однаковим.

При підвищенні теплового навантаження температура рідкого теплоносія на виході  $T_{\text{ex}}$  збільшувалася і  $\sim$  на 3500 секундів теплоносієм закипів, температура  $T_d$  стрибком зменшилася.

Далі необхідно побудувати «криву кипіння». Для цього на стаціонарних «полицях» (рис. 5) фіксувалося значення температури  $T_d$ . Далі обчислювали середню температуру тепловіддавальної стінки каналу випарника  $T_w$  за формулою (1), і графіки температур перебудовували у функції від середньої густини теплового потоку  $q$ . Результат побудови «кривої кипіння» за експериментальними даними зображеними на рис. 5 наведено на рис. 6. Також на даній «кривій кипіння» наведено зміну масового паровмісту на виході з каналу  $x_{\text{ex}}$ , який на стаціонарних режимах обчислювали за формулою:

$$x_{\text{ex}} = \frac{\frac{qF_d}{m} - C_p(T_{\text{ex}} - T_{\text{in}})}{h_{\text{lv}}}, \quad (5)$$

де  $C_p$  - теплоємність рідини за температури насичення, Дж/кг/К;

$h_{\text{lv}}$  - прихована теплота пароутворення при температурі насичення, Дж/кг.

Графіки функцій  $T_{w,\text{inc}} = f(q)$  і  $T_{d,\text{inc}} = f(q)$  при підвищенні теплового навантаження мають характерний для явища гістерезису різкий стрибок температур. Назвемо ці графіки «криві гістерезису». При зниженні теплового навантаження температура зменшується плавно, без стрибків. Назвемо графіки  $T_{w,\text{dec}} = f(q)$  і  $T_{d,\text{dec}} = f(q)$  «криві нормального кипіння». Стрибок температур стався на полиці за теплового потоку  $q_{\text{cr}} \approx 4,9 \text{ Вт/см}^2$ . Назвемо цей тепловий потік «критичним». Усі параметри при цьому означимо індексом «сг».

На «кривій гістерезису» при підвищенні теплового навантаження режими до стрибка температур  $q < 4,9 \text{ Вт/см}^2$  відповідають тепловіддачі за однофазної конвекції, яка характеризується низькими значеннями коефіцієнтів тепловіддачі  $h_{\text{exp}}$ . Паровміст потоку на виході з каналу при цьому  $x \approx 0$  (відмінність від нуля визначається похибкою вимірювань температур). Для початку кипіння стінка каналу має бути перегріта щодо температури насичення на деяку величину  $\Delta T_{w,\text{cr},\text{sat}} = T_{w,\text{cr},\text{inc}} - T_{\text{sat}}$ . Після стрибка  $q > 4,9 \text{ Вт/см}^2$  тепловіддача відбувається під час кипіння і характеризується високою інтенсивністю тепловіддачі. Паровміст потоку монотонно збільшується. Процес теплообміну в цій області збігається з «кривою нормального кипіння», що відповідає штатним режимам експлуатації термполати.

При зниженні теплового навантаження процес слідує «кривій нормального кипіння»  $T_{w,\text{dec}} = f(q)$  і  $T_{d,\text{dec}} = f(q)$ . При цьому на «кривій нормального кипіння», частина центрів пароутворення залишаються

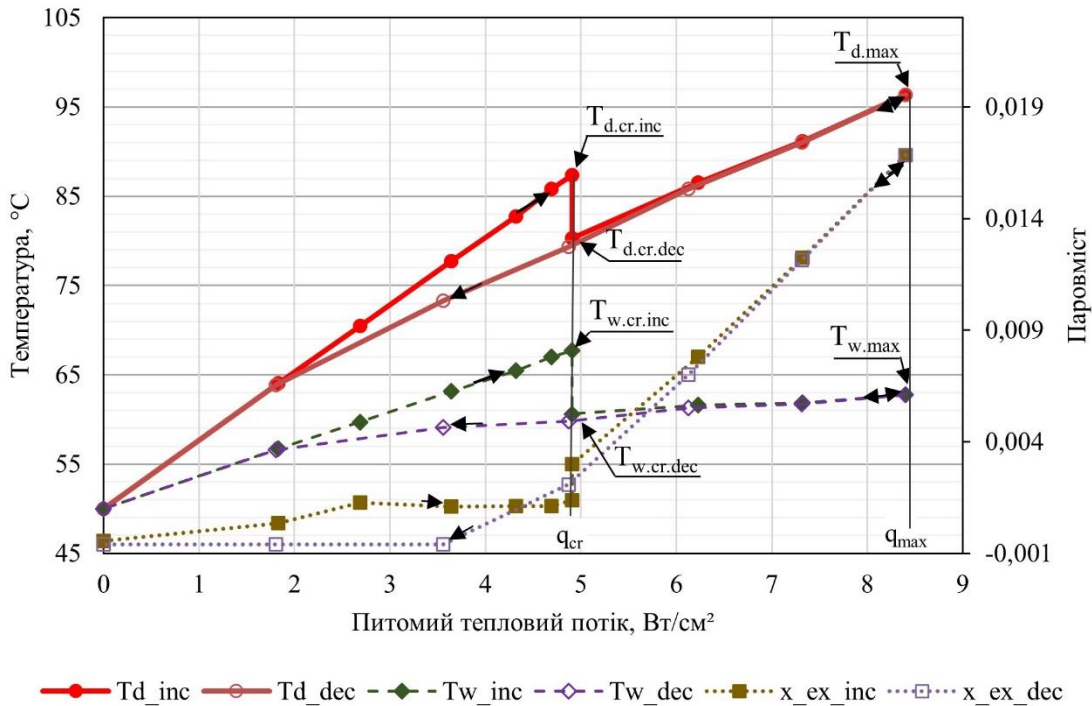


Рис. 6. Характерна крива кипіння на термоплаті НІ. Умови однозначності та основні характеристики теплового потоку:  
 $T_{sat} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{sub} = 5 \text{ K}$ ,  $m = 4,5 \text{ г/с}$ ,  $q_{ONB} = q_{cr} \approx 4,9 \text{ Вт/см}^2$ ,  $q_{max} \approx 8,4 \text{ Вт/см}^2$

активованими до  $q \sim 2,0 \text{ Вт/см}^2$ . Інтенсивність тепловіддачі в цій ділянці зберігається вищою, ніж у разі підвищення теплового навантаження,  $T_{w,dec} < T_{w,inc}$ .

Інтегральна «крива гістерезису» на рис. 6 має вигляд з одним різким стрибком температур. Аналогічний стрибок мають локальні «криві кипіння»  $q = f(T_w)$ , отримані в роботах [10, 11]. Але в цих роботах  $q$  і  $T_w$  мають сенс локальних параметрів у фіксованій точці або в перерізі каналу.

Стрибок температури  $T_w$  під час зародження кипіння викликаний необхідністю локального перегріву стінки відносно температури насичення, достатнього для утворення перших життєздатних бульбашок пари в центрах пароутворення. Умови активації центрів пароутворення по периметру і вздовж каналу випарника різні. Можна було б очікувати, що під час збільшення теплового навантаження кипіння почнеться в елементі поверхні з найбільшим перегрівом стінки та поступово поширюватиметься на інші частини поверхні, збільшуючи інтенсивність тепловіддачі в усьому випарнику. Однак досліді показують, що в цій короткій термоплаті НІ з низькою шорсткістю поверхні випарника, інтенсивне кипіння починалося одразу по всій поверхні каналу. При цьому різко збільшувався середній коефіцієнт тепловіддачі і з'являвся стрибок температур на «кривій кипіння». Після стрибка режим відповідав режиму «розвинутого кипіння», коли більшість центрів пароутворення активовані по всій поверхні

випарника. Про це свідчила рівність експериментального  $h_{exp}$  (3) і розрахункового коефіцієнта тепловіддачі за формулою Купріянової  $h_{cal}$  (4).

Розглянемо параметри, які характеризують явище гістерезису. У прикладі на рис. 5, 6 вони були такими:

- питомий тепловий потік, за якого почалося кипіння:  $q_{ONB} \approx 4,9 \text{ Вт/см}^2$ ;
- критичний питомий тепловий потік, за якого «крива гістерезису» з'єдналася з «кривою розвинутого кипіння»:  $q_{cr} \approx 4,9 \text{ Вт/см}^2$  (у цьому експерименті  $q_{cr} = q_{ONB}$ );
- перегрів стінки каналу щодо температури стінки на кривій «нормального кипіння»:  $\Delta T_{w,cr} = T_{w,cr,inc} - T_{w,cr,dec} \approx 7,1 \text{ K}$ ;
- перегрів стінки каналу щодо температури насичення:  $\Delta T_{w,cr,sat} = T_{w,cr,inc} - T_{sat} \approx 12,7 \text{ K}$ ;
- перегрів імітатора приладу відносно температури імітатора приладу на кривій «нормального кипіння»:  $\Delta T_{d,cr} = T_{d,cr,inc} - T_{d,cr,dec} \approx 7,1 \text{ K}$ ;
- перегрів імітатора приладу відносно температури насичення:  $\Delta T_{d,cr,sat} = T_{d,cr,inc} - T_{sat} \approx 32,4 \text{ K}$ .

В разі квазістаціонарного розігріву термоплати  $\Delta T_{d,cr} \approx \Delta T_{w,cr}$ .

Найбільше практичне значення має максимальний перегрів приладу щодо кривої нормального кипіння  $\Delta T_{d,cr}$ . Значний перегрів приладу може вплинути на його надійність, оскільки під час проектування електронного обладнання наявність стрибка температур, пов'язаного з гістерезисом, зазвичай не

враховують. Небезпека для надійності приладу визначається не тільки величиною  $\Delta T_{d,cr}$ , а й максимальною потужністю  $q_{max}$  і відповідною температурою  $T_{d,max}$  на стаціонарному режимі, за яких експлуатується прилад. Фактично небезпеку становить перегрів приладу, який визначається різницею:

$$\Delta T_d = T_{d,cr,inc} - T_{d,max}. \quad (6)$$

Якщо максимальний тепловий потік істотно перевищує критичний ( $q_{max} \gg q_{cr}$ ), то перегрів  $\Delta T_d$  не є небезпечним. У цьому прикладі  $T_{d,cr,inc} < T_{d,max}$ , небезпеки для експлуатації приладу немає. Однак, якщо  $q_{max} \approx q_{cr}$ , або величина  $R_H$  мала, то перегрів приладу буде  $\Delta T_d \approx \Delta T_{d,cr} \approx 7,1$  К, що вже становить небезпеку для приладу. У проведених експериментах за деяких параметрів однозначності перегрів  $\Delta T_{d,cr}$  досягав  $\sim 18$  К.

Крім цього у проведених експериментах до початку кипіння часто спостерігався метастабільний перегрів потоку рідини на виході з термоплати:

$$\Delta T_m = T_{ex,cr} - T_{sat}. \quad (7)$$

У розглянутому вище експерименті метастабільність не спостерігалася. Однак, у деяких експериментах (як по сценарію 1, так і по сценарію 2) метастабільність досягала  $\Delta T_m \approx 9$  К. Настільки високу метастабільність у НІ можна пояснити невеликою шорсткістю поверхні, малою довжиною каналу, фізичними особливостями пари матеріалів аміак-неіржавна сталь.

В окремій серії експериментів було визначено вплив режимних параметрів потоку теплоносія на параметри гістерезису. Показано, що за повільного квазістаціонарного розігріву критичний тепловий потік  $q_{cr}$ , перегрів стінки каналу випарника  $\Delta T_{w,cr}$  і приладу  $\Delta T_{d,cr}$  зменшуються зі зменшенням недогріву рідини  $\Delta T_{sub}$  і зі збільшенням температури насичення  $T_{sat}$ . При зменшенні витрати  $m$  зменшується і  $q_{cr}$ . У виконаних експериментах критичний тепловий потік  $q_{cr}$  був у діапазоні 2...8,5 Вт/см<sup>2</sup>. Гістерезис на рівні імітатора проявляється тільки при подачі в термоплату недогрітої до температури насичення рідини.

В експериментах за сценарієм 2, як правило, також спостерігався стрибок температури, характерний для гістерезису. Перегрівання приладу могло бути як більшим, так і меншим, ніж у результаті експериментів за сценарієм 2 за тих самих умов однозначності. Можливий варіант розігріву взагалі без перегріву. Швидкість зміни температури імітатора приладу  $T_d$  і теплового потоку по поверхні каналу випарника  $q$  визначається відношенням теплоємнос-

ті конструкції до потужності  $C/Q_{max}$ . Очевидно, що процес залежить також від режимних параметрів потоку теплоносія на вході і максимального теплового потоку  $q_{max}$ . Тому умови однозначності експериментів за сценарієм 2 включали чотири параметри:  $T_{sat}$ ,  $\Delta T_{sub}$ ,  $m$ ,  $q_{max}$ .

Під час опрацювання експериментів додатково використовували такі позначення параметрів (рис. 8):

- $T_{d,max}$  – максимальна температура імітатора приладу в експерименті;
- $T_{d,st,max}$  – стаціонарна температура імітатора приладу за максимального теплового навантаження;
- $\Delta T_{d,cr,st} = (T_{d,max} - T_{d,st,max})$  – максимальний перегрів імітатора приладу в експерименті;
- $K_F$  – повний коефіцієнт теплопередачі на стаціонарному режимі, який визначається за формулою.

$$K_F = \frac{q_{max} F_d}{T_{d,st,max} - T_{sat}}. \quad (8)$$

Найважливіший показник – максимальний перегрів імітатора в експерименті  $\Delta T_{d,cr,st}$ , що еквівалентний  $\Delta T_d$  (6) за умови повільного розігріву за сценарієм 1. Саме цей показник впливає на надійність експлуатації приладу.

В табл. 2 наведено експериментальні результати характерних експериментів. На рис. 7 наведено графік зміни обраних температур і теплового потоку під час даних експериментів.

Спостерігалися кілька характерних варіантів розвитку подій.

Варіант 1 – експерименти 11, 12: плавне монотонне збільшення температури імітатора до стаціонарної  $T_{d,st,max}$  без початку кипіння. Випарник працював у режимі конвективного теплообміну рідини. Експерименти характеризуються низьким значенням коефіцієнта теплопередачі  $K_F \approx 2,6...3,3$  Вт/К. Коефіцієнт тепловіддачі  $h_{exp}$  істотно менший за  $h_{cal}$ . Щільність теплового потоку зазвичай була  $q_{max} \leq q_{cr}$ . На виході з термоплати спостерігається недогріта або перегріта (метастабільна) рідина:  $x_{ex} \approx 0$ .

У інших варіантах як правило, спостерігався теплообмін при розвиненому кипінні. Вони ідентифікувалися за великими коефіцієнтами теплопередачі ( $K_F \approx 4,4...4,6$  Вт/К) і за рівністю експериментального і розрахункового коефіцієнта тепловіддачі  $h_{exp} \approx h_{cal}$ . Максимальна щільність теплового потоку в експериментах найчастіше була  $q_{max} \geq q_{cr}$ . На виході з термоплати могла бути як недогріта, так і насичена рідина:  $T_{ex} \leq T_{sat}$ . У процесі розігріву рідина на виході могла бути метастабільною  $T_{ex} > T_{sat}$ , але на стаціонарному режимі за наявності кипіння така

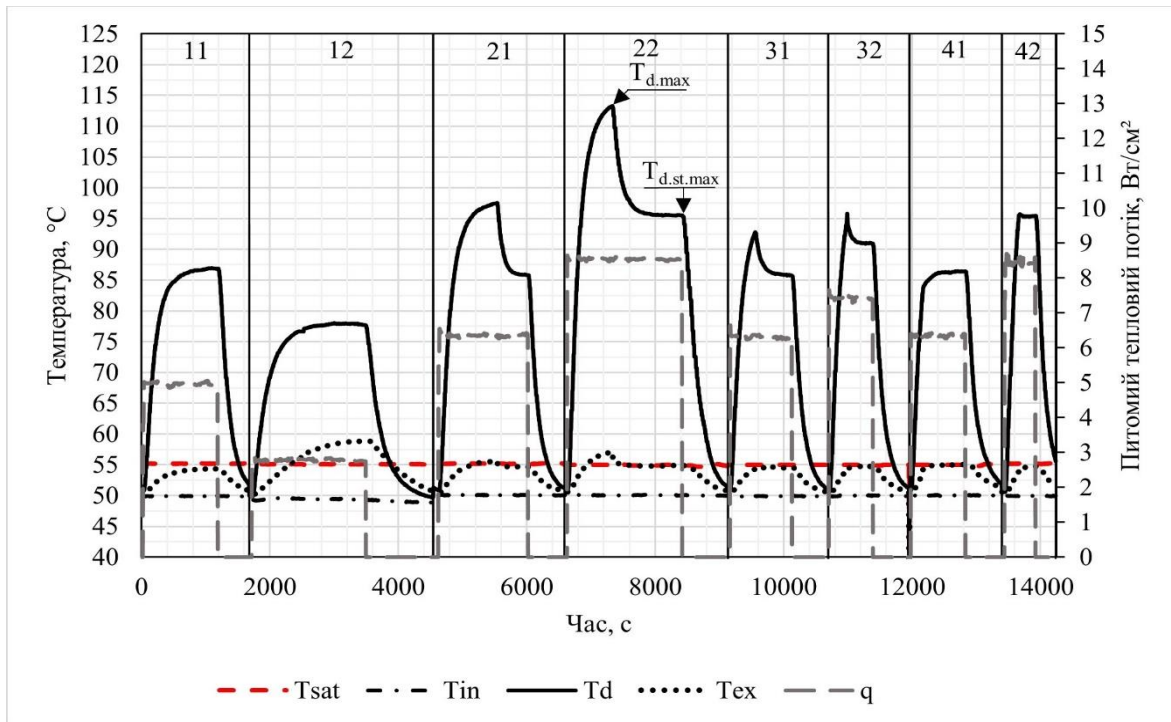


Рис 7. Експерименти за сценарієм 2 на термоплаті Н1

Таблиця 2

Експерименти за сценарієм 2 на термоплаті Н1  $T_{sat} \approx 55 \text{ }^\circ\text{C}$

Тип	Без кипіння		Розвинуте кипіння					
			Великі перегріву $\Delta T_{d,cr,st} > 9 \text{ K}$		Середні перегріву $\Delta T_{d,cr,st} \approx 4 \dots 9 \text{ K}$		Відсутність перегріву $\Delta T_{d,cr,st} \approx 0 \text{ K}$	
№ експерименту	11	12	21	22	31	32	41	42
$\Delta T_{sub}$	5	5,3	5,1	5	5,1	4,9	5	5,1
m	4,5	1	4,5	4,5	4,5	4,5	2,5	4,5
$q_{max}$	4,9	2,8	6,4	8,6	6,4	7,4	6,4	8,6
$q_{cr}$	4,9	2,8	5,6	5,6	5,6	5,6	3,9	5,6
$T_{d,max}$	86,8	77,5	97	113,3	92,8	95,8	86,5	95,4
$T_{d,st,max}$	86,8	77,5	85,7	95,5	85,7	90,9	86,5	95,4
$\Delta T_{d,cr,st}$	0	0	11,3	17,8	7,1	4,9	0	0
$K_F (8)$	3,3	2,6	4,5	4,6	4,5	4,4	4,4	4,6
$h_{exp} \cdot 10^{-3} (3)$	3,9	2,33	11184	12,3	11,1	10,6	10	12,8
$h_{cal} \cdot 10^{-3} (4)$	9,1	6	13,6	13,6	10,9	12,2	10,9	13,5
$x_{ex} (5)$	~0	~0	~0	0,016	~0	0,011	0,03	0,016
$\Delta T_m (7)$	-	3,8	-	2,2	-	-	-	-

ситуація неможлива (у табл. 2 вказано метастабільність  $\Delta T_m$  у процесі виходу на стаціонар).

Варіант 2 – експерименти 21, 22, 31, 32 з високим або середнім перегрівом імітатора: Температура зростала до максимальної  $T_{d,max}$ , а далі стрибком падала і стабілізувалася на нижчому рівні  $T_{d,st,max}$ . Термоплата переходила в режим стаціонарного теплообміну при розвиненому кипінні. В експерименті 22 спостерігався перегрів імітатора  $\Delta T_{d,cr,st} \sim 18 \text{ K}$ , що становить небезпеку для надійності приладу. В експерименті з повільного розігріву за тих самих параметрів однозначності (див. рис. 5, 6) перегрів  $\Delta T_d$  був відсутнім. Це свідчить про негативний вплив

збільшення швидкості розігріву на перегрів і надійність приладу в цій групі експериментів. Це можна пояснити затримкою активації центрів пароутворення через високу швидкість зміни теплового потоку на поверхні випарника.

Тенденції щодо впливу режимних параметрів потоку на перегрів імітатора  $\Delta T_{d,cr,st}$ , виявлені під час проведення експериментів за сценарієм 1, в основному збереглися:  $\Delta T_{d,cr,st}$  збільшується зі зменшенням m і збільшенням  $\Delta T_{sub}$ .

Варіант 3 – експерименти 41, 42 без перегріву імітатора: це найсприятливіший для практики варіант розігріву термоплати. Такий варіант розігріву



має місце за низьких витрат  $m$  і великих  $T_{\text{sat}}$ , коли максимальний тепловий потік істотно більший, ніж критичний за сценарієм 1 ( $q_{\text{max}} \gg q_{\text{cr}}$ ). Закипання тут відбувається в процесі розігріву термоплати до досягнення стаціонарного стану і на температурно-му графіку імітатора ніяк не позначається.

Звертаємо увагу на експеримент 42. За умовами однозначності він аналогічний експерименту 22. Але в експерименті 22 є перегрів  $\Delta T_{\text{d.cr.st}} \sim 18 \text{ K}$ , а в 42 - відсутній зовсім. Це пов'язано з випадковим характером явища гістерезису.

Експерименти за сценарієм 2 виявили, що вплив  $q_{\text{max}}$  на перегрів приладу  $\Delta T_{\text{d.cr.st}}$  не однозначний. Зі зростанням  $q_{\text{max}}$  перегрів спочатку збільшується, а при подальшому підвищенні  $q_{\text{max}}$  - зменшується і може зникнути взагалі. Що вища максимальна потужність експлуатації приладу  $q_{\text{max}}$  порівняно з  $q_{\text{cr}}$ , то менша ймовірність впливу гістерезису на надійність приладу.

#### 4.2. Експерименти з термоплатою NE3

Шорсткість і матеріал поверхні випарника у термоплат NE3 і H1 однакові. Термоплата NE3 відрізняється від H1 значно більшою довжиною (370 проти 98 мм) і високою поздовжньою теплопровідністю (1,6 і 0,2 (Вт·м)/К). Температуру імітатора вимірювали в трьох перетинах: на відстані 40 (T zone 1, початковий перетин), 185 (T zone 2, середній перетин) і 330 (T zone 3, кінцевий перетин) мм від входу.

Криві кипіння термоплати NE3, які отримані по експериментальному сценарію 1, за характером не відрізняються від H1. В експерименті за аналогічних умов однозначності ( $T_{\text{sat}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{sub}} = 5 \text{ K}$ ,  $m = 4,5 \text{ г/с}$ ) кипіння починається стрибком одразу в трьох перетинах, по всій поверхні термоплати. При цьому  $q_{\text{ONB}} = q_{\text{cr}}$ . До початку кипіння температура в зоні 1 істотно нижча за зони 2 і 3, оскільки на початку каналу тече холодніша рідина. Після початку кипіння температури імітатора в трьох перетинах майже вирівнюються, що характерно для розвинутого кипіння по всій довжині випарника. До початку кипіння спостерігається метастабільність на виході з випарника  $\Delta T_{\text{m}} \approx 4 \text{ K}$ . Критичний тепловий потік гістерезису  $q_{\text{cr}} \approx 2,7 \text{ Вт/см}^2$ .

При зниженні теплового навантаження кипіння зберігається і при  $q < q_{\text{cr}} \approx 2,7 \text{ Вт/см}^2$ . Температури плавно зменшуються. Кипіння припиняється тільки при  $q \approx 1,3 \text{ Вт/см}^2$ .

Перегрів імітатора в середньому перерізі склав  $\Delta T_{\text{d.cr}} \approx 10,8 \text{ K}$ , у початковому  $\sim 5,2 \text{ K}$ , а в кінцевому  $\sim 12,6 \text{ K}$ . Максимальний тепловий потік  $q_{\text{max}} \approx 6,3 \text{ Вт/см}^2$ . У середньому перерізі  $T_{\text{d.cr.inc}} > T_{\text{d.max}}$ , але перегрів незначний:  $\Delta T_{\text{d}} \approx 2,3 \text{ K}$ .

Такий перегрів не представляє небезпеки для експлуатації приладу.

У табл. 3 і на рис. 8 наведено характерні експерименти за 3-х значень максимального теплового потоку  $q_{\text{max}}$  і за умов однозначності, що відповідають сценарію 2:

- експеримент 51, відповідає варіанту 1. На виході перегріта метастабільна рідина. Кипіння немає;

- експеримент 52, відповідає варіанту 2. Кипіння розпочалося зі значним перегрівом у перерізах 2 і 3:  $\Delta T_{\text{d.cr.st}} \approx 12,1 \text{ K}$ . До початку кипіння на виході була метастабільна рідина  $\Delta T_{\text{m}} \approx 4,7 \text{ K}$ ;

- експеримент 53, відповідає варіанту 2. Повторює сценарій експерименту 52. Але перегрів зменшився,  $\Delta T_{\text{d.cr.st}} \approx 5,7 \text{ K}$ , як і припускали в розділі 4.1. При подальшому збільшенні  $q_{\text{max}}$  перегрів, імовірно, взагалі б зник.

Температури на стаціонарі після початку кипіння відповідають «кривій нормального кипіння» за сценарієм 1.

В експерименті 53 максимальний тепловий потік  $q_{\text{max}} \approx 6,3 \text{ Вт/см}^2$ , такий самий, як і в експерименті за сценарієм 1, але  $T_{\text{d.max}} \approx 81 \text{ }^\circ\text{C}$  вища за максимальні температури в разі повільного розігріву,  $T_{\text{d.cr.inc}} \approx 76 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{d.max}} \approx 73 \text{ }^\circ\text{C}$ , що підтверджує негативний вплив збільшення швидкості розігріву на перегрівання приладу.

#### 4.3. Експерименти з термоплатою NE1

Термоплати NE1 і NE3 за довжиною, матеріалом стінки випарника однакові. Але шорсткість  $R_a$  у NE1 більша, ніж у NE3  $\sim$  у 14 разів. Поздовжня теплопровідність також вища в 1,4 раза. У термоплаті реалізовано більш рівномірне підведення тепла по всьому периметру випарника. Температури імітатора вимірювали в трьох перетинах, повторюючи вимірювання на термоплаті NE3.

Характер кривих кипіння термоплати NE1 відрізняється від кривої кипіння з одним стрибком температури як у термоплатах H1 та NE3 (рис. 6). Кипіння починається в кінцевому перетині термоплати (T zone 3). Зі зростанням теплового навантаження фронт кипіння поступово просувається до початкового перетину (T zone 1). Крім цього фронт кипіння може просуватися при одному теплому навантаженні. «Крива гістерезису» має кілька невеликих стрибків у всіх перетинах. Кипіння почалося при  $q_{\text{ONB}} \approx 2,2 \text{ Вт/см}^2$ . Перехід на криву нормального кипіння стався при  $q_{\text{cr}} \approx 4,5 \text{ Вт/см}^2$ . Після цього температури у всіх трьох перерізах майже вирівнюються. У зоні 1 температура стає незначно більшою, ніж у зонах 2 і 3. Це свідчить про гірші умови теплообміну в зоні 1, наявність не повністю розвинутого кипіння на початку каналу.

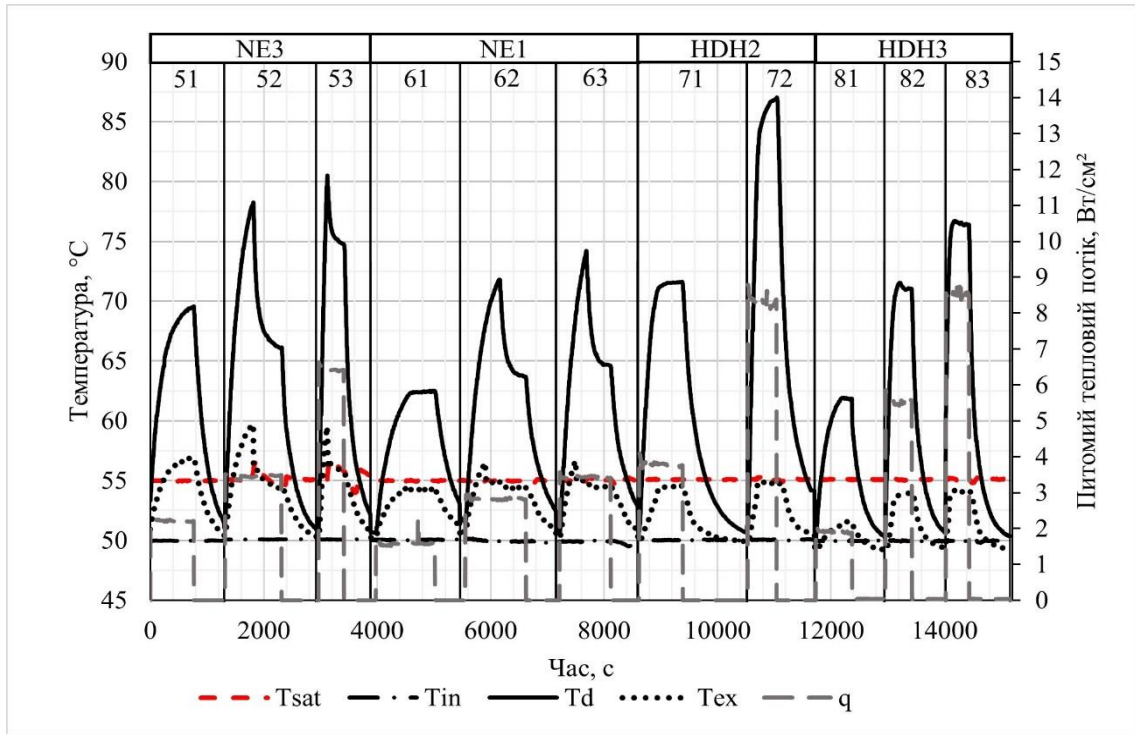


Рис. 8. Експерименти за сценарієм 2 на термоплатах NE3, NE1, HDH2, HDH3

Таблиця 3

Експерименти за сценарієм 2 на термоплатах NE3.1, NE1.1, HDH2, HDH3.  $T_{sat} \approx 55^\circ\text{C}$

Термоплата	NE3			NE1			HDH2		HDH3		
# експерименту	51	52	53	61	62	63	71	72	81	82	83
$\Delta T_{sub}$	4,8	5	5,3	4,7	4,9	5	4,9	4,9	4,9	4,9	5
m	4,52	4,49	4,51	4,51	4,52	4,91	4,53	4,18	4,5	4,5	4,5
$q_{max}$	2,2	3,4	6,3	1,6	2,3	3,4	3,8	8,4	1,9	5,6	8,5
$q_{cr}$	2,7	2,7	2,7	4,6	4,6	4,6	5,6	5,6	5,7	5,7	5,7
$q_{ONB}$	2,7	2,7	2,7	2,2	2,2	2,2	3,8	3,8	-	-	-
$T_{d,max}$	69,6	78,3	80,5	62,5	71,8	74,2	71,6	86,9	61,9	71,5	76,4
$T_{d,st,max}$	69,6	66,1	74,8	62,5	63,7	64,6	4,9	4,9	61,9	71	76,4
$\Delta T_{d,cr,st}$	0	12,1	5,7	0	8,1	9,6	0	0	0	0,5	0
$K_F(8)$	11,9	25	26,3	16,8	26	29	7,5	9	9	11	13
$x_{ex}(5)$	0,006	0,039	0,086	0,007	0,027	0,033	0,005	0,041	0,006	0,019	0,039
$\Delta T_m(7)$	2,1	4,7	0,7	-	1,3	1,8	-	-	-	-	-

На рис. 9 зображений зміна температур і питомого теплового потоку за часом під час проведення експерименту за сценарієм 1 при аналогічних умовах однозначності ( $T_{sat} = 55^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{sub} = 5\text{ K}$ ,  $m = 4,5\text{ г/с}$ ).

На рис. 10 показана «крива кипіння» у центральному перетині.

Метабільність рідини на виході з термоплати не спостерігалася.

Небезпеки перегріву приладу в разі повільного розігріву термоплати немає, оскільки  $\Delta T_d < 0$ .

У таблиці 3 і на рис. 8 наведено характерні експерименти за сценарієм 2 при 3-х значеннях максимального теплового потоку  $q_{max}$  і за умов однозначності, що відповідають сценарію 1:

– експеримент 61. Мінімальний  $q_{max}$ . В кінцевому перерізі (T zone 3) відразу почалося нерозвинене кипіння (низький  $K_F$ ). На стаціонар виходить практично без стрибків температур. На виході температура приблизно відповідає температурі насиченої рідини;

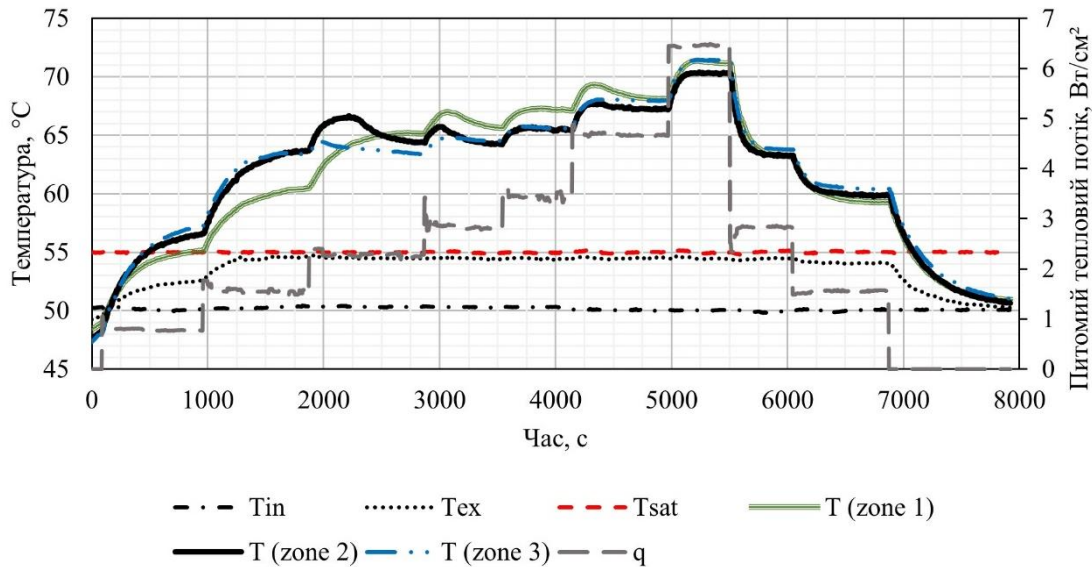


Рис. 9. Експеримент за сценарієм 1 на термоплаті NE1.

Умови однозначності та основні параметри теплового потоку:

$$T_{\text{sat}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta T_{\text{sub}} = 5 \text{ K}, m = 4,5 \text{ г/с}, q_{\text{ONB}} = 2,2 \text{ Вт/см}^2, q_{\text{cr}} \approx 4,5 \text{ Вт/см}^2, q_{\text{max}} \approx 6,3 \text{ Вт/см}^2$$

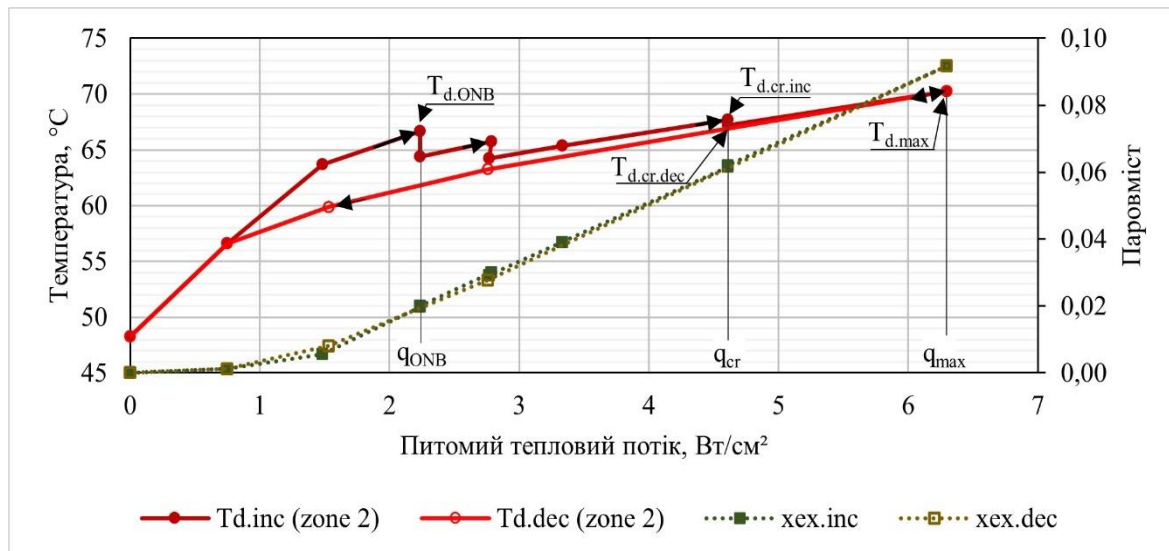


Рис. 10. Характерна крива кипіння на термоплаті NE1.

Умови однозначності та основні параметри теплового потоку:

$$T_{\text{sat}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta T_{\text{sub}} = 5 \text{ K}, m = 4,5 \text{ г/с}, q_{\text{ONB}} = 2,2 \text{ Вт/см}^2, q_{\text{cr}} \approx 4,5 \text{ Вт/см}^2, q_{\text{max}} \approx 6,3 \text{ Вт/см}^2$$

– експеримент 62. Кипіння більш інтенсивне. Спостерігається невеликий перегрів у зонах 2 і 3,  $\Delta T_{\text{d.cr.st}} \approx 8,1 \text{ K}$ . До початку кипіння на виході була метастабільна рідина;

– експеримент 63. Максимальний  $q_{\text{max}} \approx 3,4 \text{ Вт/см}^2$ . Перегрів збільшився,  $\Delta T_{\text{d.cr.st}} = 9,6 \text{ K}$ . Зберігається небезпека перегріву приладу. До початку кипіння спостерігалася метастабільність на виході  $\Delta T_m \approx 1,8 \text{ K}$ .

Як було описано раніше, можна очікувати, що при подальшому збільшенні  $q_{\text{max}}$  зменшення перегріву імітатора.

#### 4.4 Експерименти з термоплатою HDH2

Термоплата HDH2 коротша за NE1 у 2,5 рази. Матеріал і шорсткість стінки випарника однакові. Поздовжня теплопровідність менша в 3,3 рази. Вимірювання температури виконували на імітаторі в середньому перерізі і на корпусі термоплати в трьох перерізах по довжині, 38 (T zone 1), 75 (T zone 2, центральний перетин), 113 (T zone 3) мм від входу.

Криві кипіння термоплати HDH2, які отримані по експериментальному сценарію 1, за характером не відрізняються від NE1. В експерименті за аналогічних умов однозначності ( $T_{\text{sat}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{sub}} = 5 \text{ K}$ ,

$m = 4,5$  г/с) «крива гістерезису» має кілька невеликих стрибків у всіх перетинах, а кипіння починається в кінцевому перетині термоплати і поступово просувається до початкового перетину. Кипіння почалося при  $q_{ONB} = 3,8$  Вт/см<sup>2</sup>. Перехід на нормальну криву кипіння, що відповідає  $q_{cr}$ , стався при  $5,6$  Вт/см<sup>2</sup>. Після цього температура імітатора змінюється плавно, а значення у всіх трьох перетинах корпусу термоплати майже вирівнюються.

Небезпеки перегріву імітатора приладу в термоплаті HDH2 під час повільного нагрівання немає,  $\Delta T_d < 0$ .

У таблиці 3 і на рис. 8 наведено характерні експерименти по сценарію 2 за 2-х значень максимального теплового потоку  $q_{max}$  і за умов однозначності, що відповідають сценарію 1. Усі експерименти відбувалися без перегріву імітатора, хоча на корпусі термоплати зафіксований незначний перегрів характерний для гістерезису.

#### 4.5 Експерименти з термоплатою HDH3

Термопласти HDH2 і HDH3 мають практично однакову конструкцію, розміри та поздовжню теплопровідність. Однак матеріал каналу випарника і шорсткість різні. Матеріал стінки випарника - алюміній. Шорсткість  $Ra$  вища в  $\sim 2$  рази, найвища з усіх досліджених термоплат. Вимірювання температур виконували на імітаторі та на корпусі термоплати, як і на термоплаті HDH2.

На кривій кипіння термоплати HDH3 отриманій по експериментальному сценарію 1 за аналогічних умов однозначності ( $T_{sat} = 55$  °C,  $\Delta T_{sub} = 5$  K,  $m = 4,5$  г/с) не спостерігається помітних стрибків температур. Кипіння починається поступово за мінімального локального перегріву поверхні. «Крива гістерезису» і «крива нормального кипіння» збігаються.

У таблиці 3 і на рис. 8 наведено характерні експерименти по сценарію 2 за 3-х значень максимального теплового потоку  $q_{max}$  і за умов однозначності, що відповідають сценарію 1. Розігрів HDH3 відбувався без перегріву, або з незначним (в експ. 82  $\Delta T_{d,cr,st} = 0,5$  K) імітатора і корпусу термоплати. Як висновок: небезпеки перегріву приладу за повільного і швидкого розігріву термоплати HDH3 не існує.

### 5. Порівняння термоплат різної конструкції

На основі порівняння результатів експериментів з різними термоплатами можна виявити вплив деяких конструктивних параметрів на параметри гістерезису і перегрів приладу.

#### 5.1. Вплив шорсткості та матеріалу стінки

Відомо, що збільшення шорсткості знижує перегрів стінки, необхідний для початку кипіння на локальному рівні [3, 12]. Логічно припустити, що шорсткість має аналогічно позначитися і на інтегральному рівні.

Порівняння експериментів з термоплатами NE3 ( $Ra \approx 0,12$  мкм, сталь) і NE1 ( $Ra \approx 1,7$  мкм, сталь) показує, що збільшення шорсткості істотно знижує необхідний перегрів імітатора приладу для початку кипіння і змінює вигляд «кривих кипіння». За повільного збільшення теплового навантаження в термоплаті NE3 кипіння починається одним великим стрибком по всій поверхні випарника. У термоплаті NE1, що має велику шорсткість, фронт кипіння поширюється поступово від виходу до входу каналу випарника, і перегрів імітатора приладу незначний. При швидкому підвищенні теплового навантаження до максимального перегрів імітатора зі збільшенням шорсткості також зменшився. Але підвищення шорсткості каналу випарника в термоплаті NE1 не виключає негативний вплив гістерезису.

Під час порівняння термоплат HDH2 ( $Ra \approx 1,7$  мкм, сталь) і HDH3 ( $Ra \approx 3,33$  мкм, алюміній) значного перегріву імітатора HDH3 не виявлено: «криві гістерезису» і «криві нормального кипіння» майже цілком збігаються: обидві плавні, без стрибків температури. Але у випадку з термоплатою HDH3 сприятливо позначилися велика шорсткість в поєднанні з фізичними особливостями пари аміак-алюміній. При швидкому підвищенні теплового навантаження в обох термоплатах перегріву імітатора приладу не зафіксовано.

Для термоплат із низькою шорсткістю H1 і NE3 ( $Ra \approx 0,12$  мкм, сталь) характерний один значний стрибок температури на «кривій гістерезису» за  $q_{ONB} = q_{cr}$ . У термоплаті NE3 перехід до розвинутого кипіння стався з метастабільного стану.

У термоплатах із вищою шорсткістю HDH2 і NE1 ( $Ra \approx 1,7$  мкм, сталь) «крива гістерезису» має кілька невеликих стрибків температури, що означають поступовий перехід від нерозвинутого кипіння на частині поверхні випарника до розвинутого на всій поверхні,  $q_{ONB} < q_{cr}$ . Небезпека перегріву приладу незначна.

#### 5.2. Вплив довжини термоплати

Порівняємо між собою дві пари термоплат, що відрізняються довжиною  $L$  і повною поздовжньою теплопровідністю  $\lambda F$ :

- H1 ( $L = 98$  мм,  $\lambda F = 0,2$  (Вт·м)/К) та NE3 ( $L = 370$  мм,  $\lambda F = 1,6$  (Вт·м)/К);

– HDH2 ( $L = 150$  мм,  $\lambda F = 0,67$  (Вт·м)/К) та NE1 ( $L = 370$  мм,  $\lambda F = 2,2$  (Вт·м)/К);

Одночасне збільшення довжини і поздовжньої теплопровідності призводить до таких ефектів:

– характер кривих кипіння (сценарій 1) не змінюється. У першій парі кипіння починається одним стрибком по всій поверхні. А в другій парі – фронт кипіння поступово поширюється від виходу до входу в канал випарника. Фронт кипіння може поширюватися як зі зростанням теплового навантаження, так і при виході на стаціонарний режим при одному значенні теплового навантаження;

– зі збільшенням довжини знижується тепловий потік початку кипіння  $q_{\text{ОНВ}}$ ;

– на виході з довгих термоплат більш імовірний метастабільний перегрів рідини (за однакових умов однозначності). Найбільша метастабільність до  $\Delta T_m \sim 12$  К спостерігалася в каналах випарників з неіржавіючої сталі і з низькою шорсткістю  $R_a \approx 0,12$  мкм. Метастабільність могла зберігатися тривалий час, що істотно позначалося на перегріванні приладу.

Загалом збільшення довжини термоплати за однакових умов однозначності (що охоплюють максимальний тепловий потік  $q_{\text{max}}$ ) сприятливо позначається на зменшенні небезпеки перегріву приладу  $\Delta T_d$  у процесі його повільного розігріву.

## Висновки

Виконано експериментальні дослідження з аміаком в якості теплоносія на 5-ти термоплатах, що відрізняються конструктивними параметрами: довжиною, матеріалом і шорсткістю каналу випарника, поздовжньою теплопровідністю, теплоємністю конструкції тощо. Розглянуто явище гістерезису за тепловим навантаженням на інтегральному рівні. Небезпека перегріву приладу  $\Delta T_d$  після його увімкнення в процесі виходу на стаціонарний режим роботи визначається параметрами гістерезису і максимальним тепловим навантаженням  $q_{\text{max}}$ , за якого експлуатується прилад на стаціонарному режимі. Скориставшись результатами цієї роботи, є можливість уникнути небезпечного перегріву приладу внаслідок явища гістерезису.

Комплексний вплив конструктивних і режимних параметрів на параметри гістерезису не дає змоги виявити в чистому вигляді залежність від усіх окремих чинників. Тому у відповідальних проєктах рекомендується проводити прямі випробування моделей термоплат за методикою, викладеною в цій роботі. Методика охоплює експерименти з «повільного» (квазістаціонарного) і «швидкого» розігріву термоплати під час увімкнення приладу відразу на повну потужність. Перегрів приладу можливий як за

«повільного», так і за «швидкого» розігріву. Максимальний перегрів, спостережуваний у виконаних експериментах, був  $\sim 18$  К, що може становити небезпеку для надійності приладу. На основі проведених експериментів сформульовано наступні висновки.

– найбільший вплив на параметри гістерезису має величина шорсткості поверхні каналу випарника. У разі збільшення шорсткості знижується небезпека перегріву приладу: зменшуються тепловий потік початку кипіння  $q_{\text{ОНВ}}$  і перегрів приладу  $\Delta T_{d,\text{cr}}$ . Змінюється також характер розвитку кипіння в термоплаті. Якщо за шорсткості  $R_a \approx 0,12$  мкм кипіння починається одним стрибком одразу всією поверхнею випарника термоплати, то за  $R_a > 1,7$  мкм кипіння починається в зоні, близькій до виходу з каналу випарника, і поступово фронт кипіння переміщується до входу;

– збільшення довжини і поздовжньої теплопровідності сприятливо позначається на зменшенні небезпеки перегріву приладу  $\Delta T_d$  (у разі повільного розігріву термоплати й однакових умов однозначності, що включають максимальний тепловий потік  $q_{\text{max}}$ );

– у разі швидкого розігрівання термоплати на перегрів приладу неоднозначно впливає максимальний тепловий потік  $q_{\text{max}}$ : зі зростанням  $q_{\text{max}}$  перегрів спочатку збільшується, а в разі подальшого підвищення  $q_{\text{max}}$  – зменшується і може зникнути взагалі. Значне підвищення максимального теплового потоку  $q_{\text{max}}$  порівняно з критичним  $q_{\text{cr}}$  істотно знижує небезпеку впливу гістерезису на перегрів приладу;

– виконання поверхні випарника з алюмінієвого сплаву зменшує гістерезис порівняно з поверхнею з неіржавіючої сталі;

– помітного впливу способу теплопідведення в канал випарника й орієнтації нагрівача на параметри гістерезису не виявлено. Основні висновки цієї роботи можна поширити і на умови невагомості;

– збільшення швидкості розігріву термоплати негативно позначається на небезпеці перегріву приладу. Висока теплоємність термоплати знижує швидкість зміни теплового потоку по поверхні випарника;

– у виконаних експериментах перед початком кипіння часто спостерігався метастабільний перегрів потоку рідини на виході з каналу випарника до 9 К. Найбільша метастабільність мала місце у випарниках з малою шорсткістю поверхні, за малих витрат, низького тиску, невеликого переохолодження і повільного підвищення теплового навантаження. Тривала робота в режимі з метастабільністю становить небезпеку для надійності приладу;

– окремого впливу поздовжньої теплопровідності на параметри гістерезису не виявлено.

**Внесок авторів:** формулювання мети і постановки задачі досліджень, розробка дослідницького стенда, формулювання висновків – **Р. Ю. Турна**; огляд та аналіз інформаційних джерел, верифікація дослідницького стенда, аналіз та представлення результатів, формулювання висновків – **Є. Е. Роговий**.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

## Література

1. *Retrospective Review of a Two-Phase Mechanically Pumped Loop for Spacecraft Thermal Control Systems [Text]* / G. O. Gorbenko, P. H. Gakal, R. Y. Turna, A. M. Hodunov // *Проблеми машинобудування*. – 2021. – Т. 24, № 4. – С. 27–37. DOI: 10.15407/pmach2021.04.027.

2. Shi, Ming-Heng. *Analysis on hysteresis in nucleate pool boiling heat transfer [Text]* / Ming-Heng Shi, Ma Ji, Bu-Xuan Wang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1993. – Vol. 36, Iss. 18. – P. 4461–4466. DOI: 10.1016/0017-9310(93)90130-X.

3. Горбенко, Г. О. *Явище гістерезису при тепловіддачі кипінням у двофазних контурах теплоперенесення [Текст]* / Г. О. Горбенко, Є. Е. Роговий // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 5. – С. 4–20. DOI: 10.32620/akt.2022.5.01.

4. Jones, B. J. *The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer [Text]* / B. J. Jones, J. P. McHale, S. Garimella // *Journal of Heat Transfer*. – 2009. – Vol. 131, Iss. 12. – Article No. 121009. – 14 p. DOI: 10.1115/1.3220144.

5. Su, S. *Study of boiling incipience and heat transfer enhancement in forced flow through narrow channels [Text]* / S. Su, S. Huang, X. Wang // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2005. – Vol. 31, Iss. 2. – P. 253–260. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2004.11.003.

6. *Enhancing the onset of pool boiling by wettability modification on nanometrically smooth surfaces [Text]* / B. Bourdon, P. Di Marco, R. Rioboo, M. Marengo, J. De Coninck // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2013. – Vol. 45. – P. 11–15. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.04.009.

7. *Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі при розвиненому кипінні амиаку в каналі випарника термомплати [Текст]* / Г. Горбенко, Е. Решишов, Р. Турна, А. Годунов, Є. Роговий // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2022. – № 3-4. – С. 45-49. DOI: 10.20998/2078-774X.2022.03.08.

8. *Effects of Dissolved Gas Content on Pool Boiling of a Highly Wetting Fluid [Text]* / S. M. You, T. W. Simon, A. Bar-Cohen, Y. S. Hong // *Journal of Heat Transfer*. – 1995. – Vol. 117, Iss. 3. – P. 687–692. DOI: 10.1115/1.2822631.

9. Celata, G. R. *Hysteresis phenomena in sub-*

*cooled flow boiling of well-wetting fluids [Text]* / G. R. Celata, M. Cumo, T. Setaro // *Experimental Heat Transfer*. – 1992. – Vol. 5, Iss. 4. – P. 253–275. DOI: 10.1080/08916159208946444.

10. Hino, R. *Studies on heat transfer and flow characteristics in subcooled flow boiling – Part I. Boiling characteristics. [Text]* / R. Hino, T. Ueda // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1985. – Vol. 11, Iss. 3. – P. 269–281. DOI: 10.1016/0301-9322(85)90058-8.

11. *Experimental study on R-410A subcooled flow boiling heat transfer and bubble behavior inside horizontal annuli [Text]* / A. Chen, K. Li, W. Li, T. Lin, W. Yan // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2021. – Vol. 124. – Article No. 105283. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105283.

12. Толубинский, В. И. *Теплообмен при кипении [Текст]* / В. И. Толубинский. – К. : Наукова думка, 1980. – 316 с.

## References

1. Gorbenko, G. O., Gakal, P. H., Turna, R. Yu., Hodunov, A. M. *Retrospective Review of a Two-Phase Mechanically Pumped Loop for Spacecraft Thermal Control Systems. Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 27–37. DOI: 10.15407/pmach2021.04.027.

2. Shi, Ming-Heng., Ji, Ma., Wang, Bu-Xuan. *Analysis on hysteresis in nucleate pool boiling heat transfer. International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, vol. 36, iss. 18, pp. 4461–4466. DOI: 10.1016/0017-9310(93)90130-X.

3. Gorbenko, G., Rohovyi, Y. *Yavyshe histerезysu pry teploviddachi kypinnyam u dvofaznykh konturakh teploperenesennya [Hysteresis phenomenon at heat transfer by boiling in two-phase heat transfer circuits]. Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 5, pp. 4–20. DOI: 10.32620/akt.2022.5.01.

4. Jones, B. J., McHale, J. P., Garimella, S. *The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer. Journal of Heat Transfer*, 2009, no. 131, iss. 12, article no. 121009. 14 p. DOI: 10.1115/1.3220144.

5. Su, S., Huang, S., Wang, X. *Study of boiling incipience and heat transfer enhancement in forced flow through narrow channels. International Journal of Multiphase Flow*, 2005, vol. 31, iss. 2, pp. 253–260. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2004.11.003.

6. Bourdon, B., Di Marco, P., Rioboo, R., Marengo, M., De Coninck, J. *Enhancing the onset of pool boiling by wettability modification on nanometrically smooth surfaces. International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 45, pp. 11–15. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.04.009.

7. Gorbenko, G., Reshytov, E., Turna, R., Hodunov, A., Rohovyi, Y. *Rozrakhunok koefitsiyenta teploviddachi pry rozvynenomu kypinni amiaku v kanali vy-*

parnyka termoplasty [Heat Transfer Coefficient Calculation for Developed Ammonia Boiling in the Evaporator Channel of a Thermal Sink]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannya – NTU “KhPI” Bulletin: Power and Heat Engineering Processes and Equipment*, 2022, no. 3-4, pp. 45-49. DOI: 10.20998/2078-774X.2022.03.08.

8. You, S. M., Simon, T. W., Bar-Cohen, A., Hong, Y.S. Effects of Dissolved Gas Content on Pool Boiling of a Highly Wetting Fluid. *J Heat Transfer*, 1995, no. 117, pp. 687-692. DOI: 10.1115/1.2822631.

9. Celata, G. R., Cumo, M., Setaro, T. Hysteresis phenomena in subcooled flow boiling of well-wetting fluids. *Experimental Heat Transfer*, 1992, no. 5, iss. 4, pp. 253-275. DOI: 10.1080/08916159208946444.

10. Hino, R., Ueda, T. Studies on heat transfer and flow characteristics in subcooled flow boiling—Part 1. Boiling characteristics. *International Journal of Multiphase Flow*, 1985, vol. 11, iss. 3, pp. 269-281. DOI: 10.1016/0301-9322(85)90058-8.

11. Chen, C. A., Li, K. W., Li, W. K., Lin, T. F., Yan, W. M. Experimental study on R-410A subcooled flow boiling heat transfer and bubble behavior inside horizontal annuli. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, no. 124, article no. 105283. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105283.

12. Tolubinskiy, V. Y. *Teploobmen pri kipenii* [Heat exchange at boiling]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1980. 316 p.

*Надійшла до редакції 03.01.2023, розглянута на редколегії 20.02.2023*

## INFLUENCE OF CONSTRUCTION PARAMETERS OF THERMOPLATE ON THERMAL LOAD HYSTERESIS

*Yevhen Rohovyi, Rustem Turna*

The contact heat exchangers designed to remove heat from the cooled devices are used in mechanically pumped two-phase loops of thermal management systems for ground and space applications, a thermoplate (heat sink). After the device is turned on, it may overheat abnormally during the process of reaching a stationary operating mode. Overheating is associated with the phenomenon of thermal load hysteresis during the onset of boiling, the transition from single-phase convection to developed boiling in the evaporator of a heat sink material. This work **studied** the influence of the construction parameters of thermoplate on the hysteresis phenomenon at the integral level. For this purpose, a thermoplate testing methodology was implemented, which includes experiments with slow (quasi-stationary) and quick heating after turning on the device immediately at full power. Overheating of the device is possible during both "slow" and "quick" heating. The maximum overheating in the experiments performed was ~18 K. Such overheating can pose a danger to the reliability of the device. The study was performed with ammonia as a coolant on 5 models of thermoplate that differ in evaporator channel roughness, length, material, longitudinal thermal conductivity, the heat capacity of the structure, etc. The danger of overheating the device is also determined by the maximum thermal load at which the device is operated. The following **conclusions** were made: the greatest influence on the hysteresis parameters is the value of the evaporator channel surface roughness. Increasing the roughness reduces the risk of overheating the device, and changes the nature of the "boiling curves" in the thermoplate; an increase in the length and longitudinal thermal conductivity has a favorable effect on reducing the risk of overheating; the evaporator surface is made of aluminum alloy instead of stainless steel, which makes hysteresis impossible; in the case of rapid heating of the thermoplate, the maximum heat flux at steady-state has an ambiguous effect: with its increase, overheating due to hysteresis first increases, and in the case of further increase, it decreases and may disappear altogether. A significant increase in the maximum heat flux compared to the heat flux at the beginning of boiling reduces the danger of hysteresis affecting the overheating of the device. The **results** of this work provide recommendations on how to avoid the dangerous overheating of the device due to the hysteresis phenomenon.

**Keywords:** thermoplate; design; mechanically pumped two-phase loops; Onset of Nucleate Boiling; hysteresis by thermal load; ammonia; device reliability.

**Роговий Євген Едуардович** – асп. каф. аерокосмічної теплотехніки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Турна Рустем Юсуфович** – канд. техн. наук, директор Центра Технічної Фізики (ЦТФ), Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Yevhen Rohovyi** – PhD student of Dep. of Aerospace Heat Engineering, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: y.rohovyi@khai.edu, ORCID: 0000-0001-5943-0572.

**Rustem Turna** – Candidate of Technical Science, Managing Director of Center of Technical Physics (CTPh), National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: rustem.turna@ctph.com.ua, ORCID: 0000-0001-5773-1400.