

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**АЛЕКСЕЇК ОЛЬГА СЕРГІЇВНА**

УДК 536.24

**ТЕПЛООБМІН ПРИ КИПІННІ НА ГЛАДКИХ ТА ПОРИСТИХ  
ПОВЕРХНЯХ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ПРОСТОРУ**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

**Київ – 2021**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі атомних електричних станцій і інженерної теплофізики Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Кравець Володимир Юрійович,**  
Національний технічний університет України  
„Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського”, професор кафедри атомних  
електричних станцій і інженерної теплофізики

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Давиденко Борис Вікторович,**  
Інститут технічної теплофізики НАН України,  
головний науковий співробітник відділу  
теплофізичних основ енергоощадних технологій

кандидат технічних наук

**Комиш Дмитро Віталійович,**  
Інститут газу Національної академії наук України,  
науковий співробітник відділу термодімічних  
процесів і нанотехнологій

Захист дисертації відбудеться «06» травня 2021 року о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.09 в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, Київ, просп. Перемоги, 37, корпус 5, аудиторія 307.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «02» квітня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В. І. Коньшин

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Активний розвиток електронної, комп'ютерної та багатьох інших галузей потребує розробки нових, більш ефективних методів відведення теплоти від тепловиділяючих елементів. Одним із таких методів є покриття поверхні, що охолоджується, капілярними структурами.

Нанесення капілярно-пористих покриттів на поверхню нагріву дозволяє значно збільшити інтенсивність теплообміну при кипінні і у ряді випадків збільшити максимальну допустиму густину теплового потоку у порівнянні з технічно гладкими поверхнями.

Покриття із пористих структур широко застосовуються в елементах систем охолодження радіоелектронної, космічної апаратури, енергетичних установок. Зокрема, вони знайшли застосування в якості капілярних структур у двофазних теплопередаючих пристроях, наприклад, звичайних, мініатюрних, газорегульованих, контурних теплових трубах та парових камерах. Проте кипіння теплоносія в таких пристроях відбувається в умовах обмеженого простору над тепловиділяючою поверхнею, що здійснює суттєвий вплив як на процеси тепло- і масопереносу, так і на інтенсивність теплообміну. Існуючі на даний час залежності для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при кипінні на пористих поверхнях були отримані для умов великого об'єму. Тому спроби їх застосування для розрахунку інтенсивності теплообміну в зоні нагріву двофазних теплопередаючих пристроїв дають значну розбіжність з реальними, що ускладнює процес проектування таких пристроїв. Звідси випливає необхідність дослідження процесів кипіння на пористих структурах в умовах обмеженого простору.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Енергетика і енергоефективність» (Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки: Закон України від 11.06.2001 р. № 2623-III. Дата оновлення: 16.01.2016. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2623-14#Text> (дата звернення: 23.01.2021) і тісно пов'язана з дослідженням характеристик теплообміну в теплових трубах і парових камерах та розробкою високоефективних теплопередавальних систем на їх основі. Матеріали дисертаційної роботи входили до складу науково-дослідницьких програм кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», прикладних держбюджетних науково-дослідних робіт «Фізичні процеси теплообміну при мініатюризації випарно-конденсаційних систем термостабілізації» (номер державної реєстрації 0112U001656), «Процеси генерації пари новітніх теплоносіїв в замкнених мініатюрних випарно-конденсаційних системах космічного призначення» (номер державної реєстрації 0218U000012), «Процеси тепломасообміну і гідродинаміки у мініатюрних двофазних теплопередаючих системах» (номер державної реєстрації 0118U003539), які виконувались за тематичним планом науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є визначення інтенсивності теплообміну при кипінні на технічно гладких поверхнях та пористих структурах в умовах обмеженості зовнішнього простору і для різних характеристик цих структур.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі основні *задачі*:

1. Модифікувати дослідну установку з метою створення умов обмеженості при дослідженні процесу кипіння;
2. Розробити методику експериментального дослідження процесу теплообміну при кипінні на капілярно-пористих структурах та методику обробки експериментальних даних;
3. Експериментально дослідити основні характеристики процесу кипіння на пористих поверхнях;
4. Розвинути фізичні уявлення про механізм процесу кипіння на пористих структурах в умовах обмеженого простору;
5. Отримати залежності, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю, визначати значення коефіцієнтів теплообміну при кипінні на пористих поверхнях з врахуванням впливу обмеженості умов.

*Об'єкт дослідження* – процес теплообміну при кипінні на гладких поверхнях та капілярно-пористих структурах.

*Предмет дослідження* – характеристики теплообміну при кипінні на гладких та пористих поверхнях та механізми тепломасопереносу в таких процесах.

**Методи дослідження.** При розв'язанні вищевказаних задач були використані методи експериментального визначення характеристик кипіння та аналітичне дослідження процесів тепломасообміну.

**Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:**

1. Вперше досліджено вплив розмірів волокон, пористості та товщини пористого покриття на інтенсивність процесу кипіння в умовах обмеженого простору;
2. Вперше виявлені три характерні області зміни інтенсивності теплообміну при кипінні в умовах зміни висоти вільного простору над тепловіддаючою поверхнею та встановлено зв'язок границь областей із характеристиками структури та теплоносія, умовами теплопідведення.
3. Розвинуто фізичну модель процесу тепломасопереносу при кипінні на пористих поверхнях в умовах обмеженого простору.
4. Вперше отримані емпіричні залежності для визначення інтенсивності теплообміну при кипінні на пористих поверхнях в умовах обмеженості простору із врахуванням характеристик пористої структури.
5. Розроблено методику інженерного розрахунку двофазного теплопередавального пристрою на прикладі парової камери.

Матеріал дисертації розширює аспекти наукових знань про процеси кипіння на пористих та гладких поверхнях

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані результати допомагають зрозуміти механізми тепломасообміну при кипінні на гладких та пористих поверхнях, виявити фактори, що впливають на дані механізми, та можуть бути використані для обґрунтування технічних рішень при проектуванні різноманітних систем тепловідведення і передачі теплоти з використанням

капілярно-пористих структур в радіоелектронному та комп'ютерному, енергетичному та промисловому обладнанні.

Матеріали дисертаційної роботи застосовуються в навчальному процесі теплоенергетичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського при підготовці студентів спеціальності 144 Теплоенергетика.

Результати роботи були використані ПП «НВФ Теплові Технології» при розробці систем охолодження для електронних модулів космічного апарату «MASCOT».

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати, приведені у дисертаційній роботі, отримані особисто автором або при його безпосередній участі: створення експериментального стенду та дослідних зразків, проведення експериментальних досліджень, аналіз дослідних даних та виявлення впливу характеристик поверхонь і структур на процес кипіння в обмежених умовах, отримання узагальнюючих залежностей для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі, створення фізичної моделі кипіння на пористій структурі в умовах обмеженого простору; створення методики розрахунку двофазних теплопередавальних пристроїв, підбір розрахункових залежностей, проведення експериментальних досліджень і обробка отриманих даних по визначенню термічного опору парових камер.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи доповідались на VIII-й, IX-й, XI-й, XVII-й та XVIII-й Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (Україна, м. Київ, квітень 2010 р., квітень 2011 р., квітень 2013 р., квітень 2019 р. та квітень 2020 р.), XII-й, XIII-й, XV-й та XIX-й Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» (Україна, м. Одеса, травень 2011 р, червень 2012 р., травень 2013 р. та червень 2018 р.), на спільній 18-й Міжнародній конференції «ІНРС» та 12-ому Міжнародному симпозиумі «ІНРС» (Корея, м. Чеджу, червень 2016 р.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 18 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у виданнях іноземних держав, які входять до наукометричної бази SCOPUS (країни ЄС); 5 статей у наукових фахових виданнях України), 1 стаття в інших виданнях, 10 тез доповідей та матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів та переліку використаних джерел з 122 найменувань. Загальний обсяг роботи складає 173 сторінки тексту, з них 89 рисунків та 8 таблиць, 3 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, вказана мета та основні задачі, об'єкт та предмет досліджень, наведені методи досліджень, представлена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, надана інформація щодо особистого внеску здобувача та апробацію результатів роботи, приведені основні публікації здобувача, описана структура та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** описані існуючі підходи щодо опису процесу кипіння на гладкій (В.І. Толубінський, H.S. Lee, P. Stephan) та пористій (О.Н. Маньковський, А.А. Шаповал, М.Г. Семена, М.А. Стирікович, А.С. Зуйков, R.V. Makbet) поверхнях. Проведено огляд сучасного рівня експериментальних досліджень процесів кипіння на метало-волокнистих, сіткових, порошкових, конструкційних та нанопористих капілярних структурах (КС). Показано особливості впливу основних характеристик таких структур, зокрема товщини, пористості та ефективного діаметру пор на інтенсивність теплообміну при кипінні на них (А.А. Шаповал, Ю.В. Фрідріхсон, A. Brautsch, Ch. Li, J.T. Cieslinski). Також проведено аналіз досліджень впливу вказаних характеристик на критичну густину теплового потоку (Ю.А. Кузма-Кичта, Ch. Li, M.A. Halnon). Виявлені деякі протиріччя між описаними в літературі результатами досліджень. Наведено порівняльний аналіз найбільш використовуваних типів КС.

Представлено розрахункові залежності, які дозволяють розрахувати інтенсивність теплообміну при кипінні на КС у великому об'ємі (А.А. Шаповал, М.Г. Семена, Ю.В. Фрідріхсон, R. Pastuszko, M.S. Alam).

Аналіз літературних джерел показав, що на даний час для випадку кипіння на КС не існує єдиної теорії, яка б пояснювала усю повноту явищ, що відбуваються. Крім цього, результатів, наведених у літературі, для деяких типів пористих покриттів недостатньо для того, щоб можна було однозначно встановити характер впливу того чи іншого чинника на інтенсивність процесу кипіння у пористому покритті. Практично відсутні дані по кипінню у КС в умовах капілярного транспорту теплоносія та в умовах обмеженого простору.

На основі проведеного аналізу було обрано один з найбільш перспективних типів капілярних структур – метало-волокнисті і виконано постановку задачі дослідження.

У **другому розділі** описано конструкції дослідного стенду та робочих елементів. Представлені характеристики структур, що були досліджені. Описані методики обробки дослідних даних та результати розрахунку похибок експериментальних досліджень. Проведено перевірку достовірності методики експериментальних досліджень шляхом співставлення отриманих результатів із даними, опублікованими іншими авторами.

Дослідний стенд (рис. 1) складався з таких основних елементів та систем: робоча камера РК розмірами  $10 \times 10 \times 10 \text{ см}^3$ , всередині якої розміщувався робочий елемент РЕ та обмежувач об'єму ОО; системи створення, контролю та підтримання постійності умов проведення досліду (С1); системи підведення та вимірювання теплового навантаження на РЕ (С2); системи вимірювання температур (С3).

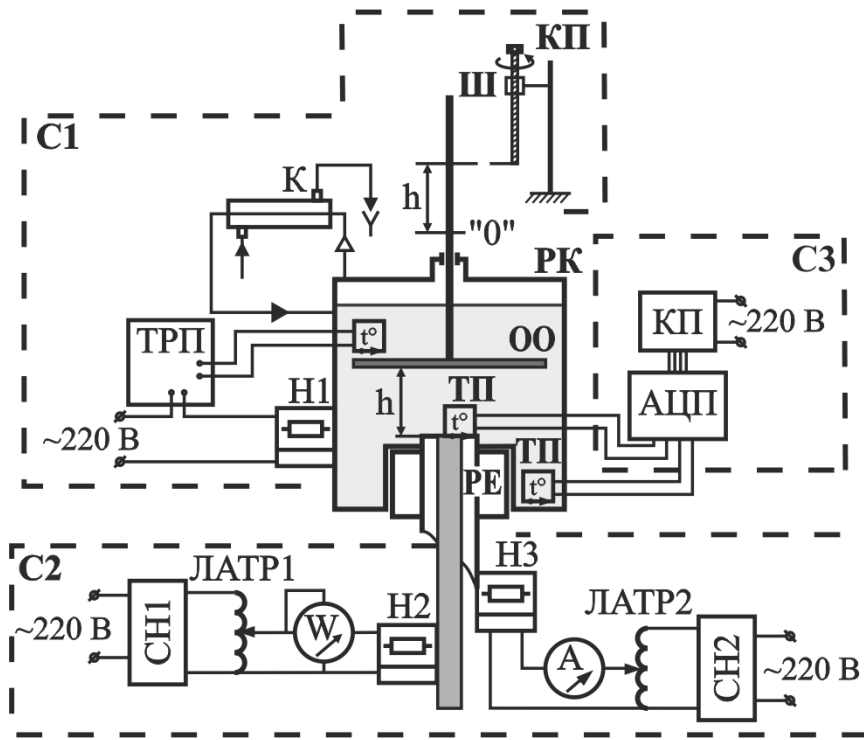
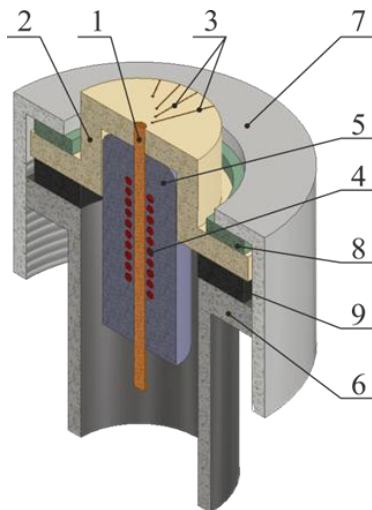


Рис.1. Схема експериментальної установки

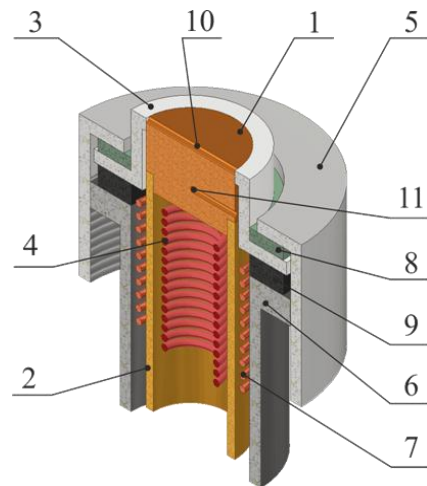
РК – робоча камера;  
 РЕ – робочий елемент;  
 ОО – обмежувач об'єму;  
 Ш – шток; ТП – мідь-  
 константанова термопара;  
 КП – координатний пристрій;  
 С1: Н1 – нагрівач;  
 ТРП – терморегулюючий  
 пристрій; К – конденсатор;  
 КП – координатний пристрій;  
 С2: Н2,3 – електронагрівач;  
 W – ватметр; А – амперметр;  
 ЛАТР1,2 – лабораторний  
 автотрансформатор;  
 СН1,2 – стабілізатор напруги;  
 С3: АЦП – аналого-цифровий  
 перетворювач ICP CON I-7018Z;  
 ПК – персональний комп'ютер

При проведенні досліджень використовувалися три типи робочих елементів: гладкі поверхні малого (I тип) та значного (II тип) розміру; пористі поверхні значного розміру (III тип) (рис.2). Під поверхнями малого розміру маються на увазі такі, для яких розмір самої поверхні має вплив на процеси тепломасообміну, що протікають на ній. Для поверхонь значного розміру такий вплив відсутній.



1 – мідний тепловідляючий стрижень;  
 2 – теплоізолююча шайба; 3 – термопари;  
 4 – нагрівач; 5 – тепла ізоляція; 6 – корпус РЕ;  
 7 – притискна гайка; 8, 9 – ущільнюючі кільця

а)



1 – мідна втулка; 2 – корпус електронагрівача;  
 3 – теплоізолююча шайба; 4 – електронагрівач  
 робочого елемента; 5 – притискна гайка; 6 – корпус;  
 7 – охоронний електронагрівач; 8, 9 – ущільнюючі  
 шайби; 10, 11 – верхня та нижня термопари

б)

Рис. 2. Конструкції робочих елементів I типу (а) та II і III типів (б)

В якості поверхні теплообміну виступав торець мідного стрижня (тип I) або втулки (тип II, III). У випадку дослідження кипіння на КС, вона приєднувалась до мідної втулки за допомогою тонкого шару припою. Підведення теплоти

здійснювалось за допомогою ніхромових електронагрівачів, розташованих у нижній частині РЕ. Для зменшення тепловтрат в навколишнє середовище, електронагрівач був вкритий шаром базальтової теплової ізоляції. Величина підведеного до поверхні теплообміну теплового потоку визначалась за показами термопар, розташованих на осі РЕ на самій поверхні та нижче неї. Верхня частина РЕ за допомогою термостійкого епоксидного клею вклеювалась врівень з торцем теплоізолюючої шайби. Втрати теплоти через бічну поверхню стрижня або втулки в шайбу розраховувалися за результатами вимірювання її температурного поля. Шайба з мідним РЕ розміщувались у металевому корпусі і утримувались у ньому притискною гайкою.

Основні розміри робочих елементів (табл. 1) та характеристики досліджених КС (табл.2) представлені нижче.

Таблиця 1 – Розміри робочих елементів

№	Діаметр елемента, мм	Відстань між термопарами в РЕ, мм	Діаметр шайби, мм	Товщина шайби, мм	Радіуси розташування термопар у шайбі, мм			
					r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>4</sub>
1	0,88	4,20	20,0	1,78	1,26	2,20	3,67	4,78
2	1,73	7,51	20,0	2,95	1,65	2,37	3,33	4,07
3	4,94	9,80	21,0	3,43	4,00	5,25	6,05	7,00
4	14,0	3,75	19,8	1,80	-	-	-	-

Таблиця 2 - Характеристики зразків із капілярно-пористих структур

№	Діаметр волокон, мкм	Довжина волокон, мм	Товщина КС, мм	Пористість, %
1	10	3	1,01	77,4
2	20	3	1,06	81,5
3	30	3	1,05	81,6
4	50	3	1,02	79,1
5	50	5	1,00	80,0
6	50	7	1,01	80,4
7	50	3	1,00	65,1
8	50	3	1,00	75,3
9	50	3	1,01	85,3
10	20	3	0,42	82,7
11	20	3	0,5	78,8

Інтенсивність теплообміну при кипінні визначалась за залежністю:

$$\alpha = Q_{\text{відв}} / [F_e \cdot (T_e - T_p)], \quad (1)$$

де  $F_e$  – площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>;  $T_e$  – температура поверхні теплообміну, К;  $T_p$  – температура рідини, К;  $Q_{\text{відв}}$  – кількість теплоти, що відводиться, Вт:

$$Q_{\text{відв}} = Q_{\text{підв}} - Q_{\text{втр}} = \frac{\lambda_e \cdot F_e}{\delta} \cdot (T_{\text{ниж}} - T_{\text{верх}}) - Q_{\text{втр}}, \quad (2)$$

тут  $\lambda_e$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу тепловідляючого елемента, Вт/(м·К);  $\delta$  – відстань між верхньою  $T_{\text{верх}}$  та нижньою  $T_{\text{ниж}}$  термопарами у РЕ, м;  $Q_{\text{втр}}$  – втрати теплоти через бічну поверхню мідного елемента, Вт.



Визначення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  проведено з похибкою не більше  $\pm 5-7\%$ .

З метою перевірки коректності отриманих даних було проведено співставлення з літературними даними (В.П. Ісаченко, Ю.В. Фрідріхсон), яке показало що розбіжність не перевищує  $\pm 10-12\%$ .

У третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень температурних характеристик поверхонь та визначена інтенсивність теплообміну при кипінні в залежності від теплового навантаження, розмірів поверхні та характеристик покриття (розмірів волокон, пористості та товщини), а також висоти обмеженого об'єму рідини над поверхнею.

Результати досліджень показали, що висота вільного простору суттєво впливає на характер залежності перегріву гладкої поверхні значного розміру від висоти між теплообмінною та обмежуючою поверхнями ( $h$ ) і густини підведеного теплового потоку ( $q$ ) (рис.3). В області низьких і середніх теплових потоків ( $q < 200 \text{ кВт/м}^2$ ) зменшення відстані між поверхнями  $h$  призводить до зменшення перегріву поверхні теплообміну. При  $q > 300 \text{ кВт/м}^2$  спостерігався зворотній зв'язок – зростання перегріву поверхні теплообміну зі зменшенням відстані  $h$ . Такі явища пояснюються тим, що при низьких теплових потоках парові бульбашки приєднуються до парового утворення (рис. 4, б) і процес генерації пари відбувається безперервно, на відміну від кипіння у великому об'ємі (рис. 4,а), коли після відриву парової бульбашки від поверхні протягом деякого часу («періоду мовчання») центрів пароутворення (ЦПУ) не працює. При цьому, прохідний переріз для доступу рідини до діючих ЦПУ є достатнім. По мірі зростання густини теплового потоку, а, відповідно, кількості пари і висоти парового утворення, підтікання рідини до діючих ЦПУ ускладнюється, що призводить до погіршення умов теплообміну.

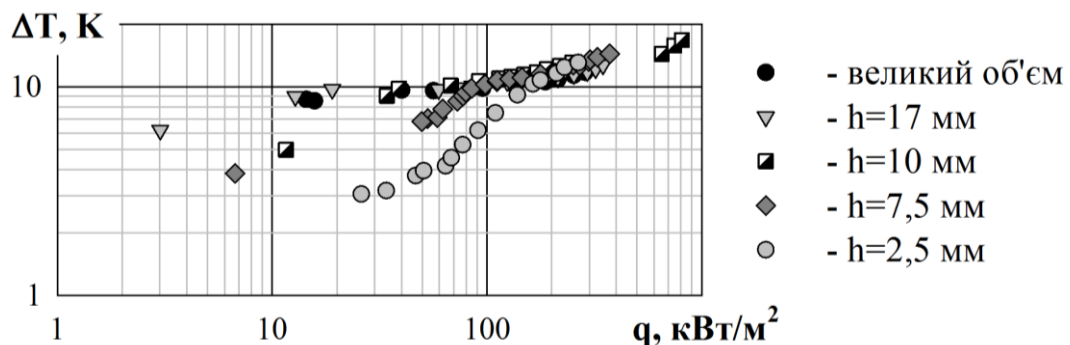


Рис. 3. Залежність перегріву гладкої поверхні від густини підведеного теплового потоку при кипінні

а)

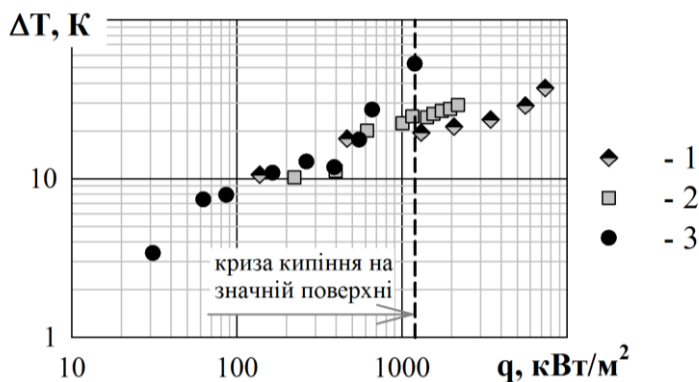


б)



Рис. 4. Візуалізація процесу кипіння на гладкій поверхні у великому об'ємі (а) та при висоті вільного простору 7,5 мм (б) ( $q=80 \text{ кВт/м}^2$ )

Характер залежності перегріву поверхні теплообміну від густини теплового потоку для гладких поверхонь малого розміру значною мірою подібний до кривих, отриманих для поверхонь значного розміру. Причиною цього є також вплив парового утворення під обмежуючою поверхнею на процес кипіння. Однак, слід зазначити, що для таких поверхонь, відстань, при якій починає проявлятися вплив обмеженості, суттєво залежить від розміру поверхні теплообміну – чим менший розмір поверхні, тим при менших висотах  $h$  проявляється вплив. встановлено, що величина перегріву відносно температури насичення при густинах відведених теплових потоків  $q > 300 \text{ кВт/м}^2$  в значній мірі залежить від діаметра поверхні теплообміну (рис. 5). Чим менший був діаметр поверхні, тим меншим був її перегрів. Це пояснюється зменшенням товщини теплового пограничного шару із зменшенням діаметру поверхні.



діаметр поверхні: 1 – 0,88 мм; 2 – 1,73 мм; 3 – 4,94 мм

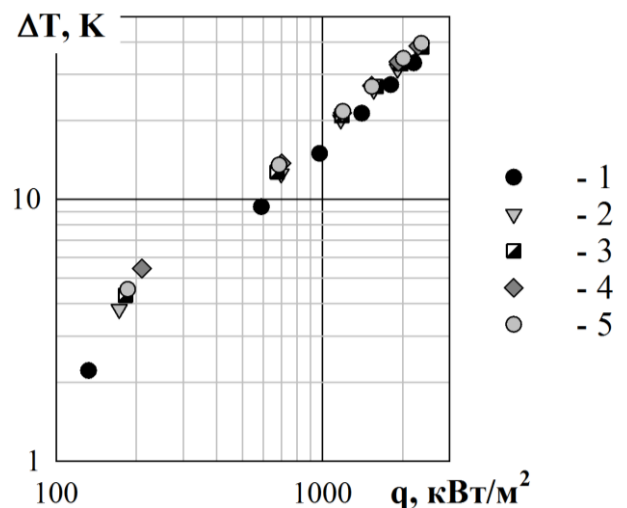
Рис.5. Перегрів гладкої поверхні в залежності від її діаметру при кипінні у великому об'ємі

просторі між КС та обмежувачем, тобто зовні структури. На процес кипіння, що протікає всередині КС, парове утворення впливає опосередковано.

При цьому збільшення відстані між обмежуючою та теплообмінною поверхнями з пористим покриттям призводить до зменшення перегріву поверхні відносно температури насичення і, відповідно, збільшення інтенсивності теплообміну. Вплив обмеженості простору тим більший, чим вища густина теплового потоку, що передається. Погіршення умов тепловідводу при значних густинах теплового потоку пов'язано з ускладненням умов або неможливістю підтоку рідини до верхньої частини капілярної структури.

Аналізуючи результати досліджень було виявлено, що зміна висоти обмежувача над поверхнею тепловіддачі має найменший вплив на характер кривих перегріву для поверхонь із капілярними структурами (рис. 6).

Це пояснюється тим, що парове утворення, яке виникає над капілярною структурою (рис. 7) найбільше впливає на масоперенос рідини та пари в



1 – великий об'єм; 2 –  $h=22,5$  мм; 3 –  $h=17,5$  мм; 4 –  $h=7,5$  мм; 5 –  $h=2,5$  мм.

Рис.6. Залежність перегріву поверхні із капілярною структурою (зразок №2, табл. 2) від густини підведеного теплового потоку при кипінні

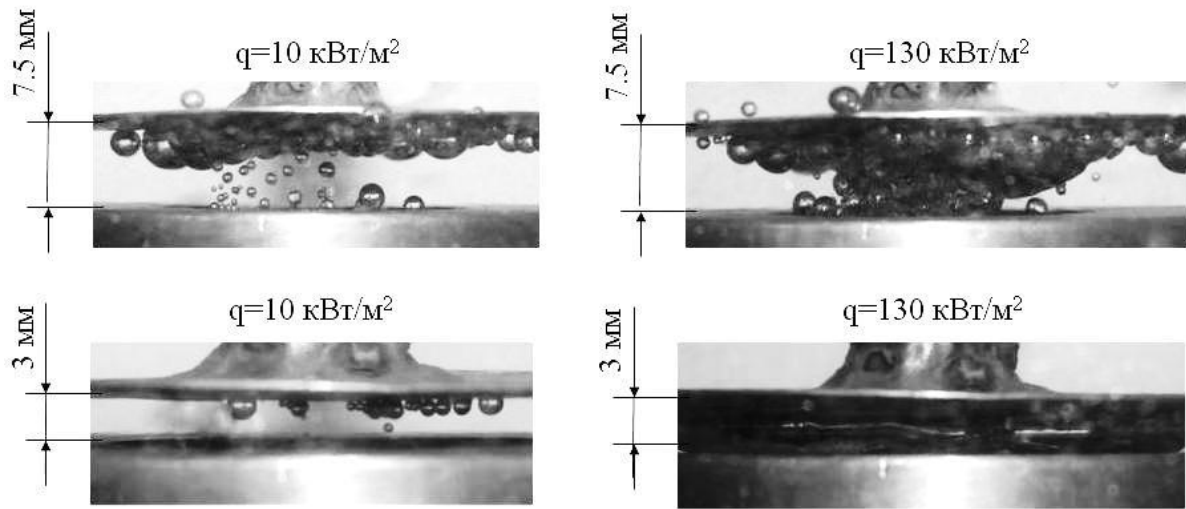
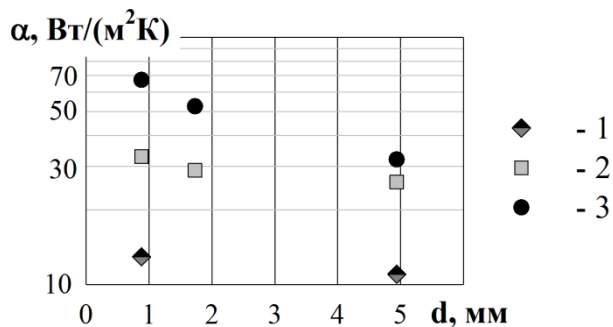


Рис.7. Візуалізація процесу кипіння на пористій структурі (зразок №4, табл.2) в умовах обмеженого простору

В роботі були проведені дослідження при покроковому нагріванні, а потім охолодженні теплообмінної поверхні, що дозволило б виявити наявність температурного гістерезису. Вони показали, що на гладкій поверхні значного розміру гістерезис в дослідженій області теплових потоків не спостерігається. Такий результат пояснюється тим, що на поверхні значного розміру велика кількість центрів пароутворення і тому активація або деактивація декількох з них не призводить до суттєвої зміни температури поверхні, на відміну від кипіння на гладкій поверхні малого розміру. Аналогічні результати були отримані при кипінні на КС, і вони не залежали від характеристик волокон КС та її товщини.

Як було показано вище, на процес кипіння на гладкій поверхні в значній мірі впливають її геометричні розміри. Аналіз впливу діаметра поверхні на інтенсивність теплообміну показав, що при густинах теплових потоків  $q < 300 \text{ кВт/м}^2$  інтенсивність теплообміну в значній мірі залежить від кількості діючих ЦПУ, причому по мірі збільшення густини теплового потоку їх кількість зростає і вплив на інтенсивність



1 –  $q \approx 140 \text{ кВт/м}^2$ ; 2 –  $q \approx 450 \text{ кВт/м}^2$ ;  
3 –  $q \approx 1300 \text{ кВт/м}^2$

Рис. 8. Вплив діаметра поверхні теплообміну на інтенсивність процесу кипіння води у великому об'ємі

теплообміну практично зникає. В області густин теплових потоків  $q > 300 \text{ кВт/м}^2$  характерним є зростання інтенсивності теплообміну при зменшенні діаметра поверхні теплообміну (рис. 8). Такий вплив пояснюється, по-перше, зменшенням товщини теплового пограничного шару над поверхнею тепловідведення, а по-друге, покращенням умов доступу рідини до діючих ЦПУ.

Результати досліджень впливу густини теплового потоку на інтенсивність теплообміну в залежності

від висоти вільного простору  $h$  на гладкій поверхні наведені на рис. 9. Отримані результати свідчать про те, що вплив відстані між теплообмінною і обмежуючою

поверхнями при кипінні води проявляється при значеннях  $h \leq 10$  мм ( $h \leq 4 \cdot l_c$ , тут  $l_c$  – капілярна стала).

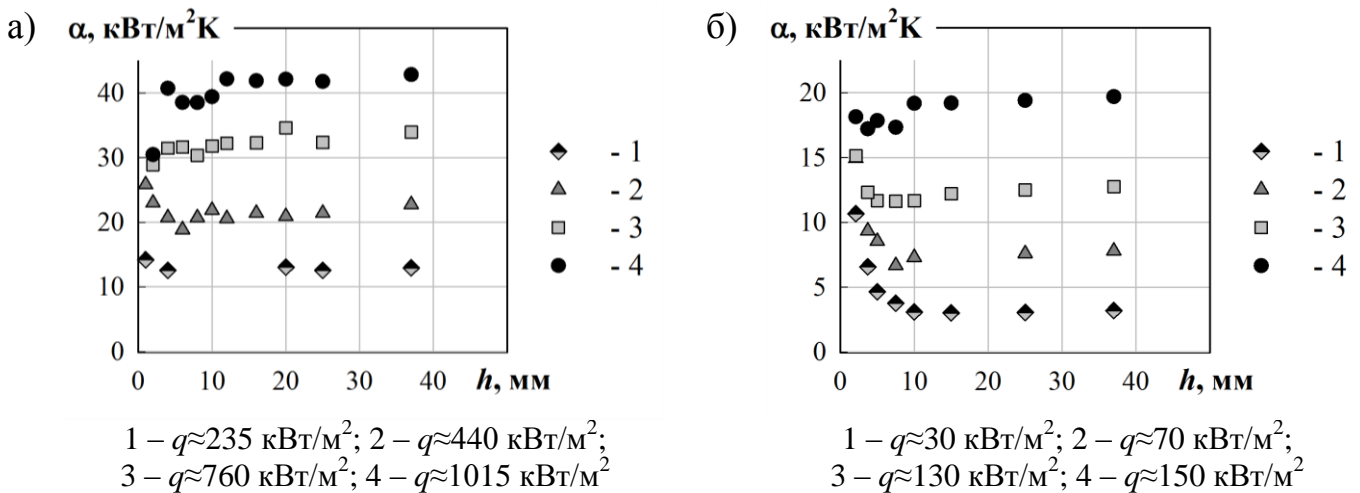


Рис. 9. Залежність інтенсивності теплообміну від висоти вільного простору при кипінні на гладкій поверхні малого (а) та значного (б) розміру

При низьких густинах теплових потоків ( $q < 140$  Вт/м<sup>2</sup>) зменшення висоти  $h$  призводить до підвищення інтенсивності теплообміну внаслідок того, що в утвореному щілинному каналі починають діяти капілярні сили і покращуються умови доступу рідини до діючих ЦПУ. При вищих густинах теплових потоків утворена щілина швидко заповнюється паром і за рахунок високої швидкості її руху, рідина, що рухається до ЦПУ, гальмується, виникає її нестача в області активного кипіння і, відповідно, інтенсивність теплообміну знижується. Описаний ефект тим більше виражений, чим більші розміри має поверхня.

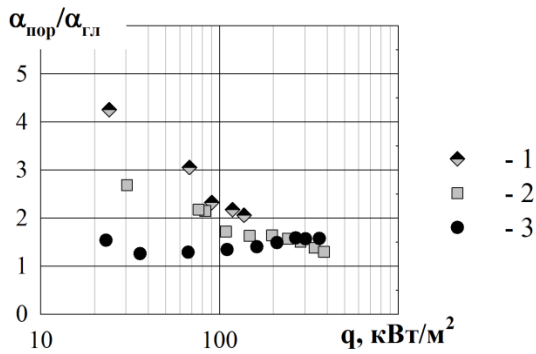
Було проведено дослідження впливу таких характеристик пористої структури, як діаметр і довжина волокон, її пористість і товщина на інтенсивність теплообміну при кипінні в умовах обмеженого простору.

Дослідження показали, що характер зміни інтенсивності теплообміну при збільшенні густини підведеного теплового потоку не залежить від діаметра волокон і лишається подібним при зміні висоти вільного простору над поверхнею теплообміну. Збільшення інтенсивності теплообміну пов'язано, як і у випадку кипіння на гладкій поверхні, зі збільшенням кількості активних ЦПУ і зростанням швидкості пароутворення на них. Слід відмітити, що для капілярних структур будь-якого діаметру інтенсивність теплообміну в 1,5-4 рази вища за інтенсивність теплообміну на гладкій поверхні (рис. 10).

В проведених дослідженнях при кипінні на КС були досягнуті густини теплових потоків, що в 2-3 рази перевищували критичні при кипінні на гладких поверхнях у великому об'ємі, але криза теплообміну при цьому не спостерігалась. Це пов'язано з тим, що при наявності капілярної структури, по-перше, підведення рідини до ЦПУ відбувається у більш сприятливих умовах, оскільки в КС відбувається розділення руху фаз, а по-друге, відсутній простір для утворення парової плівки над поверхнею.

Аналізуючи вплив діаметру волокон на інтенсивність теплообміну при різних висотах між теплообмінною та обмежуючою поверхнями, було встановлено, що при

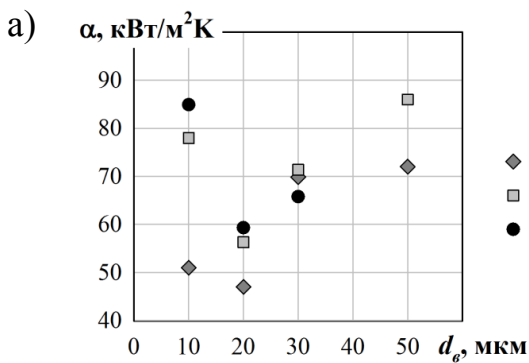
зменшенні діаметра до 20 мкм відбувається зниження інтенсивності теплообміну при кипінні (рис. 11).



1 – великий об'єм;  
2 –  $h=7,5$  мм; 3 –  $h=2,5$  мм

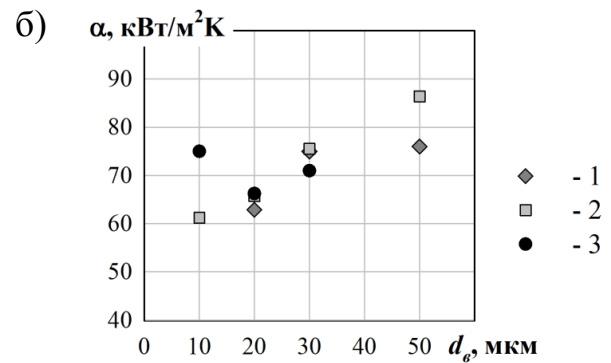
Рис.10. Співставлення інтенсивності теплообміну при кипінні на гладкій та пористій поверхні порівнянні з погіршенням умов переносу фаз теплоносія.

Це пояснюється тим, що при зменшенні діаметра волокон відбувається суттєве зменшення ефективного діаметра КС (на 40-60% на кожні 10 мкм). Останнє призводить до різкого зростання гідравлічного опору КС, зменшення її проникності і, відповідно, зменшення інтенсивності теплообміну. Зростання інтенсивності теплообміну на КС діаметром 10 мкм пов'язано, з переважаючим впливом збільшення площі поверхні теплообміну (більше ніж у 2 рази при зменшенні ефективного діаметра в 1,4 рази) між КС та теплоносієм у ній

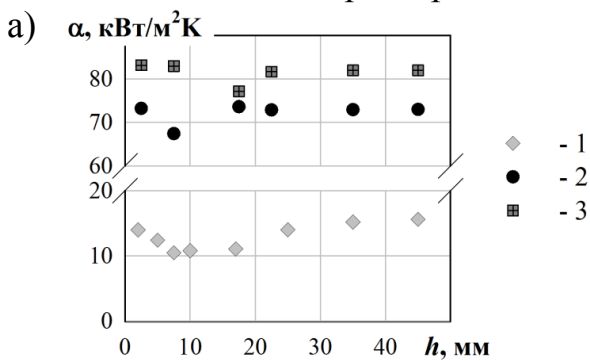


1 –  $q \approx 500$  кВт/м<sup>2</sup>; 2 –  $q \approx 1500$  кВт/м<sup>2</sup>; 3 –  $q \approx 2200$  кВт/м<sup>2</sup>

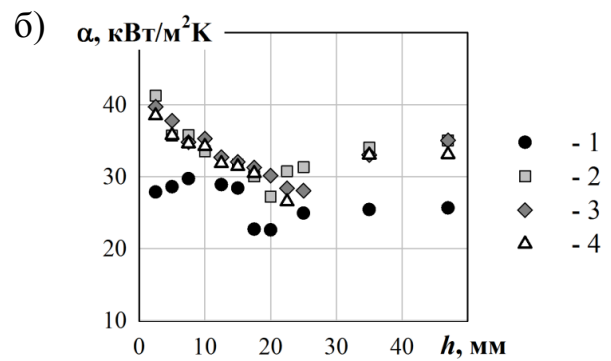
Рис. 11. Вплив діаметра волокон на інтенсивність теплообміну при кипінні на КС у великому об'ємі (а) та при  $h=7,5$  мм (б)



Було встановлено, що, подібно до кипіння на гладкій поверхні в обмежених умовах, зміна інтенсивності теплообміну при кипінні на КС при зменшенні висоти носить нелінійний характер.



1 –  $q \approx 35$  кВт/м<sup>2</sup>; 2 –  $q \approx 500$  кВт/м<sup>2</sup>;  
3 –  $q \approx 1200$  кВт/м<sup>2</sup>



1 –  $q \approx 120$  кВт/м<sup>2</sup>; 2 –  $q \approx 370$  кВт/м<sup>2</sup>;  
3 –  $q \approx 1100$  кВт/м<sup>2</sup>; 4 –  $q \approx 1400$  кВт/м<sup>2</sup>

Рис. 12. Вплив діаметра волокон на інтенсивність теплообміну при кипінні на КС з діаметром волокон  $d_b=50$  мкм (а) та при  $d_b=30$  мкм (б)

Зменшення відстані між теплообмінною та обмежуючою поверхнями до певного значення, яке суттєво залежить від діаметра волокон та інших характеристик КС (рис. 12), призводить до погіршення умов тепловідведення – коефіцієнт тепловіддачі набуває свого мінімального значення. При подальшому зменшенні відстані  $h$  відбувається інтенсифікація процесу теплообміну при кипінні. Аналіз дослідних даних показав, що при високих теплових потоках ( $q > 400$  кВт/м<sup>2</sup>) ступінь інтенсифікації майже не залежить від цієї величини.

Дослідження впливу довжини волокон на інтенсивність теплообміну при кипінні в умовах обмеженого простору показали, що ця характеристика також суттєво впливає на процеси тепломасопереносу і що існує певна оптимальна довжина, при якій коефіцієнт тепловіддачі набуває найбільшого значення (рис. 13, 14).

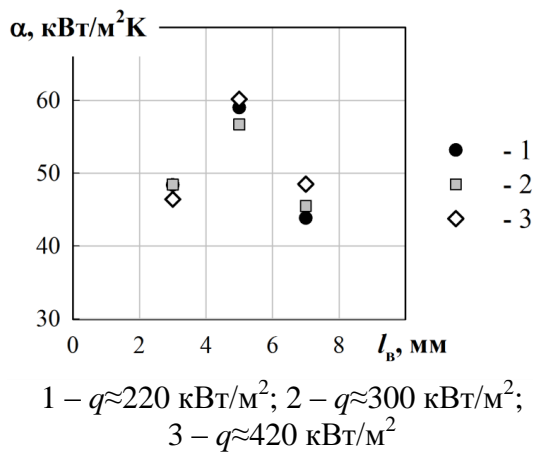


Рис. 13. Вплив довжини волокон на інтенсивність теплообміну при кипінні на КС при  $h=2$  мм

Це пояснюється тим, що при оптимальній довжині волокон кількість каналів великого діаметра, по яким здійснюється відведення пари, є достатньою для забезпечення інтенсивного тепловідведення. При цьому кількість каналів значного діаметру не настільки велике, як для КС з більшою довжиною волокон, коли пара при малих висотах обмежувача над поверхнею теплообміну захоплює рідину, що надходить в капілярно-пористу структуру і відносить її, внаслідок чого відбувається осушення КС. У той же час при довжині волокон, меншій за оптимальну, кількість каналів придатних для евакуації парової фази менше, її гідравлічний опір більший, і, відповідно, інтенсивність теплообміну також є нижчою.

Результати щодо впливу відстані між теплообмінною та обмежуючою поверхнями  $h$  на інтенсивність теплообміну виявилися подібними до отриманих раніше (рис.15), проте для КС з довжиною волокон 5 мм ефекти інтенсифікації виявилися значно слабшими – коефіцієнт тепловіддачі при зменшенні  $h$  збільшується до 8% в порівнянні з 20% при кипінні на КС з діаметром волокон  $d_b=30$  мкм і довжиною  $l_b=3$  мм (рис. 12, б).

Результати щодо впливу відстані між теплообмінною та обмежуючою поверхнями  $h$  на інтенсивність теплообміну виявилися подібними до отриманих раніше (рис.15), проте для КС з довжиною волокон 5 мм ефекти інтенсифікації

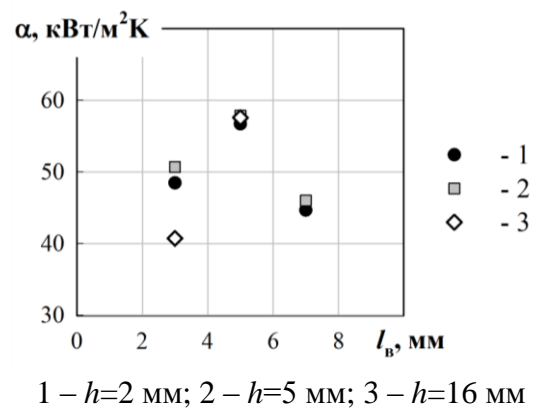
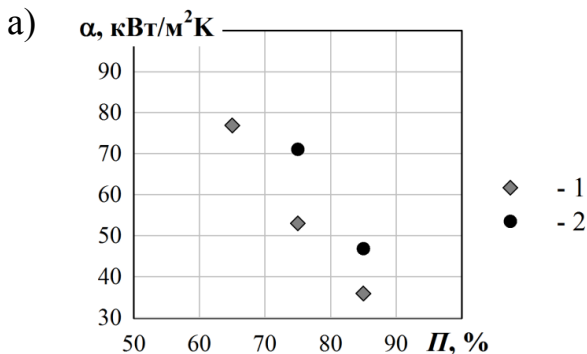


Рис. 14. Вплив довжини волокон на інтенсивність теплообміну при кипінні на КС при  $q \approx 300$  кВт/м<sup>2</sup>

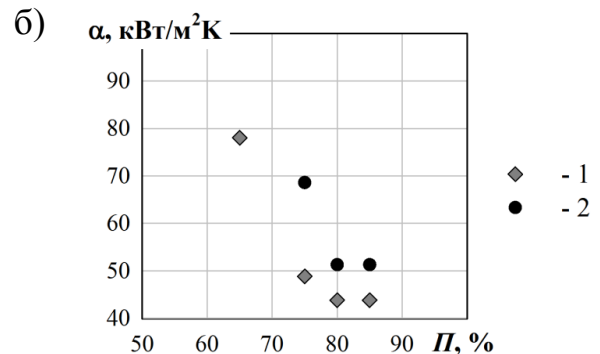
виявилися значно слабшими – коефіцієнт тепловіддачі при зменшенні  $h$  збільшується до 8% в порівнянні з 20% при кипінні на КС з діаметром волокон  $d_b=30$  мкм і довжиною  $l_b=3$  мм (рис. 12, б).

Аналіз результатів досліджень щодо впливу пористості КС на інтенсивність теплообміну при кипінні показав, що при збільшенні пористості спостерігалось зменшення інтенсивності теплообміну (рис. 16).

Збільшення пористості призводить до: 1) зменшення ефективної теплопровідності КС, що призводить до зменшення кількості ЦПУ всередині КС на віддаленні від теплообмінної поверхні; 2) зменшення площі поверхні теплообміну між КС та рідиною, що знаходиться в порах; 3) зменшення поверхні контакту між капілярною структурою та поверхнею теплообміну; 4) зменшення капілярного напору; 4) збільшення проникності; 5) зменшення гідравлічного опору виходу парової фази. Перші два фактори превалюють над іншими, що призводить у підсумку до зниження інтенсивності теплообміну. Проте слід враховувати, що для пористих структур, виготовлених із тонких волокон (10-20 мкм), зменшення пористості в деяких умовах може призвести до погіршення умов тепловідведення через суттєве зростання гідравлічного опору КС.



1 –  $q \approx 500 \text{ кВт/м}^2$ ; 2 –  $q \approx 1500 \text{ кВт/м}^2$

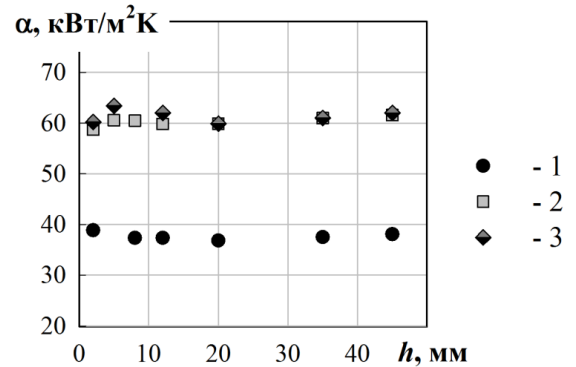


1 –  $q \approx 120 \text{ кВт/м}^2$ ; 2 –  $q \approx 400 \text{ кВт/м}^2$

Рис.16. Вплив пористості на інтенсивність теплообміну при кипінні на КС у великому об'ємі (а) та при  $h=5$  мм (б)

Результати досліджень впливу відстані між теплообмінною і обмежуючою поверхнями на інтенсивність теплообміну для КС різних пористостей добре узгоджуються із отриманими для інших КС (рис. 17).

Були виявлені області зниження інтенсивності теплообміну для висот від 10 мм до 22,5 мм, а також область інтенсифікації теплообміну в діапазоні висот від 5 мм до 10 мм. Слід відмітити, що для високопористих КС ( $\Pi \approx 85\%$ ) в області висот менше 5 мм спостерігалось зниження інтенсивності теплообміну при високих теплових



1 –  $q \approx 120 \text{ кВт/м}^2$ ; 2 –  $q \approx 360 \text{ кВт/м}^2$ ;  
3 –  $q \approx 420 \text{ кВт/м}^2$

Рис. 15. Вплив висоти  $h$  на інтенсивність теплообміну при кипінні на КС з довжиною волокон  $l_b=5$  мм

потоках ( $q > 300$  кВт/м<sup>2</sup>). За таких умов утворення значної кількості пари перешкоджає доступу рідини до ЦПУ, внаслідок чого КС частково осушується.

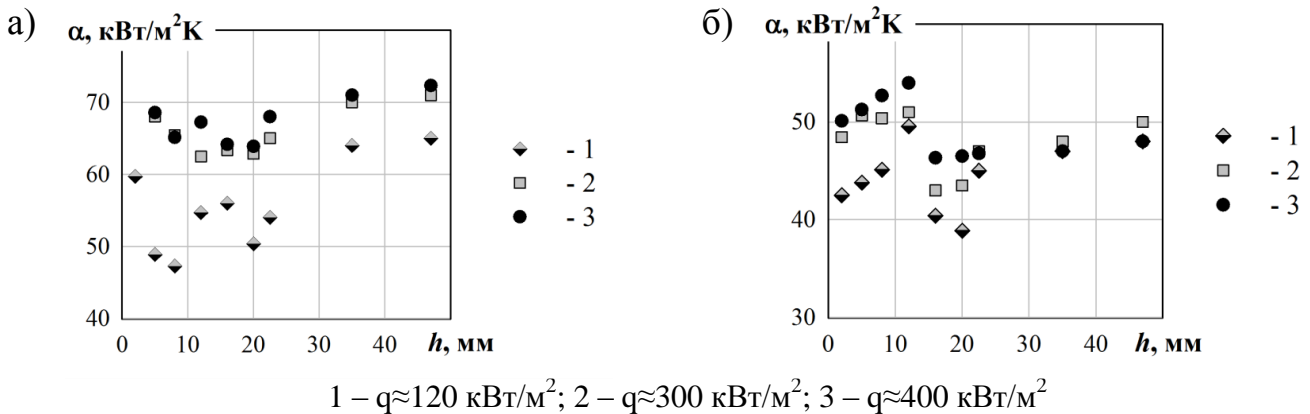
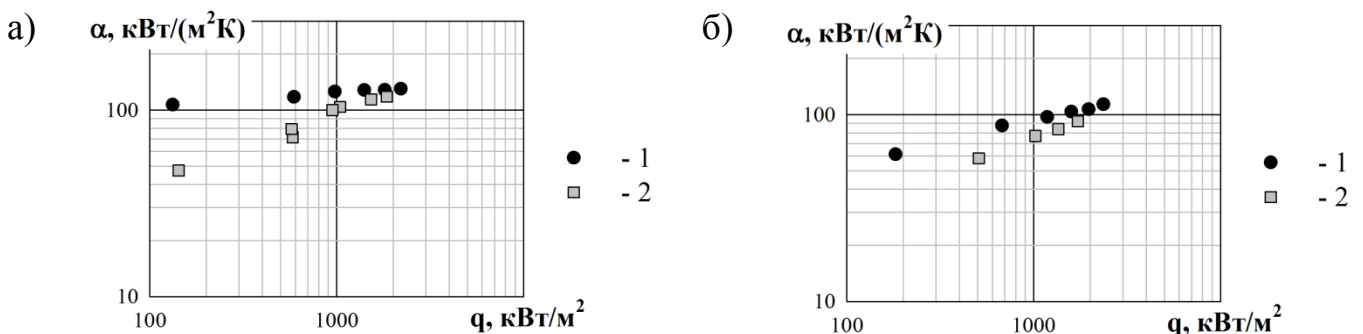


Рис.17. Вплив висоти вільного простору  $h$  на інтенсивність теплообміну при кипінні на КС з пористістю  $P=75\%$  (а) та  $P=85\%$  (б)

Також було встановлено, що зменшення товщини КС призводить до зниження інтенсивності теплообміну при кипінні (рис. 18). При використанні більш товстої структури ( $\delta \approx 1$  мм) площа поверхні теплообміну значно більше, ніж при використанні структури товщиною  $\delta \approx 0,41$  мм. В той же час, збільшення гідравлічного опору такої структури несуттєве, що призводить, в цілому, до збільшення кількості теплоти, що відводиться від поверхні теплообміну.



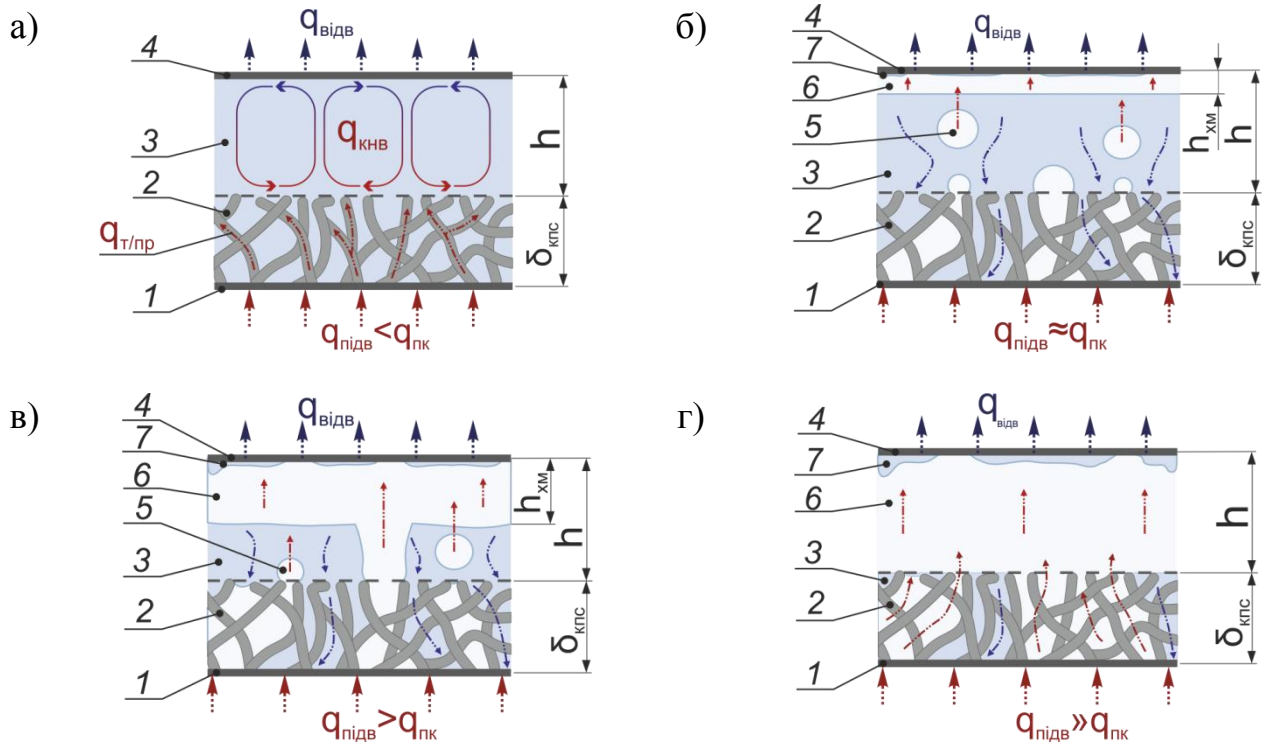
Товщина КС: 1 –  $\delta=1$  мм; 2 –  $\delta=0,41$  мм;

Рис. 18. Інтенсивність теплообміну при кипінні на КС у великому об'ємі (а) та при  $h=17,5$  мм (б) для її різних товщин

У четвертому розділі представлено фізичну модель теплообміну при кипінні на пористій поверхні в умовах обмеженого простору та результати узагальнення дослідних даних.

Виділено чотири основних режими в залежності від інтенсивності теплопідведення та відстані між пористою та обмежуючою поверхнями: вільноконвективного теплообміну (рис. 19, а); кипіння на пористій структурі в умовах її затоплення теплоносієм при відсутності впливу парового утворення у верхній частині робочого простору (рис. 19, б) та при наявності впливу парового утворення (рис. 19, в); кипіння у пористій структурі в умовах капілярного транспорту теплоносія (рис. 19, г).





1 – несуча стінка; 2 – пористе покриття; 3 – теплоносій; 4 – обмежувач;  
5 – парові бульбашки; 6 – парова хмара; 7 – краплі конденсату

Рис. 19. Режими теплообміну при кипінні на КС в умовах обмеженого простору

В тому випадку, коли величина підведеного теплового потоку є недостатньою для виникнення процесу кипіння ( $q < q_{пк}$ ), передача теплоти відбувається шляхом теплопровідності крізь насичену рідиною капілярно-пористу структуру із коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_{еф}$  і далі – від капілярно-пористої структури до рідини – за рахунок вільної конвекції (рис. 19, а). При цьому конвективними течіями у пористій структурі можна знехтувати внаслідок незначних розмірів пор. У об'ємі, розташованому між обмежувачем та КС, виникають циркуляційні контури – комірки Релея-Бенара.

При досягненні густини теплового потоку, достатньої для початку кипіння, біля стінки всередині КС починає утворюватися пара, яка витісняє рідку фазу із каналів найбільшого діаметра, поступає до верхньої границі КС. Після цього на поверхні КС починають утворюватися парові бульбашки. Крім цього, пара утворюється за рахунок випаровування плівки рідини, що вкриває стінки парогенеруючих пор. Після відриву парової бульбашки від КС, вона спливає і затримується біля обмежувача. При накопиченні бульбашок у верхній частині вони об'єднуються у єдине парове утворення – парову хмару. Якщо висота вільного об'єму рідини над КС велика у порівнянні із висотою парової хмари або при незначній інтенсивності пароутворення, наявністю парової хмари і її впливом на процес генерації пари на КС можна знехтувати. Проведені дослідження показали, що ця відстань становить  $h = (7-9) \cdot l_c$  (рис. 19, б). На обмежувачі, за рахунок відведення від нього теплоти, утворюються окремі області з плівкою конденсату, який у вигляді крапель повертається до основного об'єму рідини.

При значенні співвідношення  $h/l_c < 9$  та при значних густинах відведеного теплового потоку парове утворення, що виникає при об'єднанні окремих парових

бульбашок, впливає на процес кипіння на КС. Займаючи певну частину каналу між теплообмінною та обмежуючою поверхнями, воно в околі ділянок виходу пари з КС може ускладнювати підтік рідини до КС за рахунок її гальмування зустрічно направленим потоком пари (рис. 19, в).

Подальше зниження обмежувача або збільшення густини теплового потоку призводить до збільшення розмірів парового утворення. Причому цей процес буде відбуватися до тих пір, поки парове утворення не займе весь доступний простір (рис. 19, г). В умовах капілярного транспорту теплоносія деякі області КС можуть заповнюватися паром та осушуватися, що може призвести до зростання температури поверхні теплообміну, зниження інтенсивності теплообміну і поступово, при збільшенні підведених густин теплового потоку, викликати кризу кипіння. Зволоження КС відбувається за рахунок її зрошення краплями та струменями конденсату з обмежувача.

Після узагальнення результатів досліджень з інтенсивності теплообміну при кипінні у великому об'ємі для поверхонь малого розміру була отримана залежність:

$$\text{Nu} = 0,184 \cdot \text{Re}^{0,72} \cdot \text{Bo}^{-0,3} \cdot \text{Pr}^{0,45} \quad (3)$$

тут в числах Нусельта  $\text{Nu} = \alpha \cdot l_c / \lambda$ , Рейнольдса  $\text{Re} = w \cdot l_c / \nu$  та Бонда  $\text{Bo} = d / l_c$  в якості визначального розміру обрана капілярна стала  $l_c$ . Визначальна швидкість – швидкість пароутворення  $w = q_{\text{відв}} / (r \cdot \rho'')$ . Визначальна температура – температура насичення.

Залежність (3) можна використовувати для поверхонь теплообміну розмірами від  $d = 0,8 \dots 5,0$  мм в діапазоні густин теплових потоків  $q_{\text{відв}} = 3,1 \cdot 10^4 \dots 7,4 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> при кипінні дистильованої води та в діапазоні густин теплових потоків  $q_{\text{відв}} = 2,7 \cdot 10^5 \dots 1,3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> при кипінні етилового спирту. Зазначена залежність узагальнює понад 80% експериментальних даних. Середнє відхилення становить  $\pm 15\%$ , а максимальне не перевищує  $\pm 25\%$ . Співставлення результатів розрахунку з дослідними даними представлено на рис. 20.

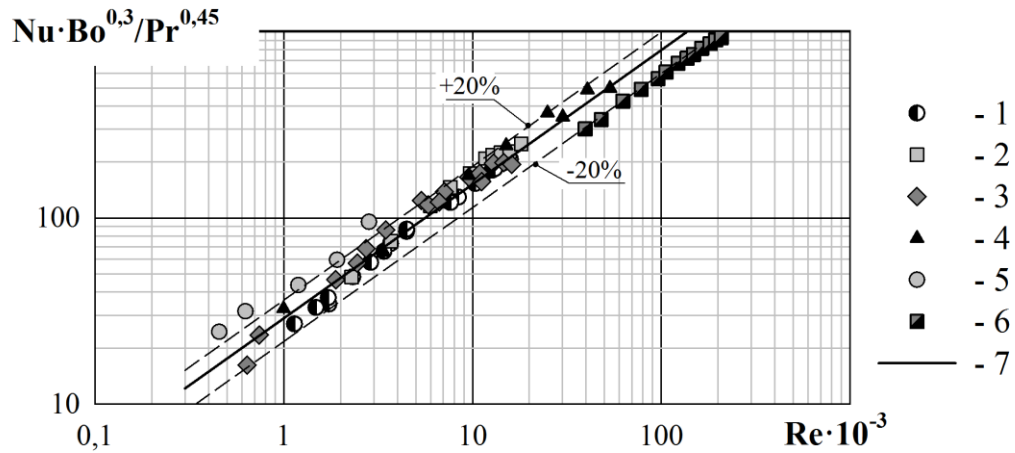
Залежність (3) може бути використана для розрахунків інтенсивності теплообміну при кипінні в бульбашковому режимі. В області білякритичних густин теплового потоку результати розрахунку перевищують реальні значення коефіцієнтів тепловіддачі більше ніж на 25-30%. Це пов'язано із погіршенням умов теплообміну внаслідок виникнення сухої плями на поверхні теплообміну.

Для кипіння на поверхнях малого розміру в умовах обмеженого простору була отримана така залежність для розрахунку інтенсивності теплообміну:

$$\text{Nu} = 0,1 \cdot \text{Re}^{0,73} \cdot \text{Bo}^{-0,3} \cdot \text{Pr}^{0,45} \cdot (h/l_c)^{0,05} \quad (4)$$

де  $h$  – відстань по нормалі між теплообмінною та обмежуючою поверхнями, м.

Залежність (4) рекомендована до використання для відстаней  $h$  в діапазоні  $(1 \dots 10) \cdot l_c$ . Для  $h > 10 \cdot l_c$  інтенсивність теплообміну рекомендовано визначати за залежністю (3). Середнє відхилення результатів розрахунку за (4) від результатів експериментального дослідження становить  $\pm 15\%$ , а максимальне не перевищує  $\pm 25\%$  (рис. 21).



1 – вода,  $d_{\text{пов}}=1,73$  мм, 1 серія; 2 – вода,  $d_{\text{пов}}=1,73$  мм, 2 серія; 3 – вода,  $d_{\text{пов}}=1,75$  мм [17];  
4 – вода,  $d_{\text{пов}}=0,88$  мм; 5 – вода,  $d_{\text{пов}}=4,94$  мм; 6 – етанол,  $d_{\text{пов}}=1,73$  мм; 7 – розрахунок за (3)

Рис. 20. Порівняння дослідних даних із розрахунком при кипінні у великому об'ємі

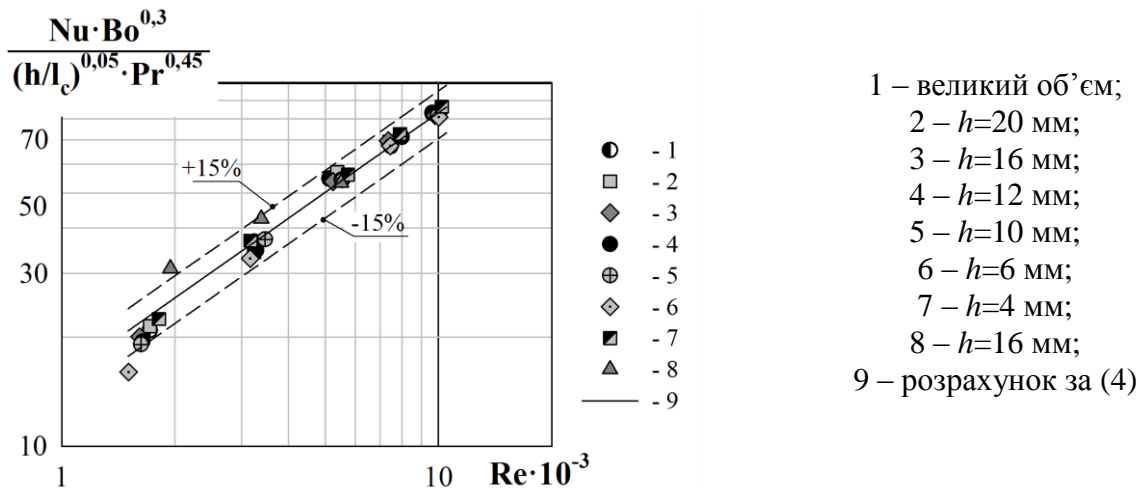


Рис.21. Порівняння дослідних даних із розрахунком при кипінні води на поверхні  $d=1,73$  мм в умовах обмеженого простору

Після узагальнення дослідних даних з інтенсивності теплообміну при кипінні в обмежених умовах на метало-волокнистих КС товщиною 0,7-1,0 мм та пористістю 65-85% була отримана залежність виду:

$$\frac{\text{Nu}_h}{\text{Nu}_{h \rightarrow \infty}} = 0.0067 \left( \frac{h}{l_c} \right)^2 - 0.067 \left( \frac{h}{l_c} \right) + 0.984, \quad (5)$$

де  $\text{Nu}_h$  – число Нусельта для кипіння на капілярній структурі в обмежених умовах;  $\text{Nu}_{h \rightarrow \infty}$  – число Нусельта для кипіння на капілярній структурі у великому об'ємі;  $h$  – відстань між обмежувачем та верхньою поверхнею КС.

Формула (5) отримана в діапазоні відношень  $l_c \leq h \leq 10 \cdot l_c$ .

Для розрахунку числа Нусельта для кипіння на КС в умовах великого об'єму  $\text{Nu}_{h \rightarrow \infty}$  були отримані наступні залежності. Якщо  $\text{Re} = 10 \dots 120$ ,

$$\text{Nu}_{h \rightarrow \infty} = 2.3 \cdot \text{Re}^n \cdot \left( \frac{1 - \Pi_{\text{пр}}}{1 - \Pi} \right)^{0,63} \quad (6)$$

де  $n = 0,46 \dots 0,5$ ;  $\Pi_{\text{пр}}$  – гранична пористість, що визначається за рекомендаціями М.Г. Семена:

$$\Pi_{\text{пр}} = \exp(-6 \cdot d_{\text{в}} / l_{\text{в}}), \quad (7)$$

де  $d_{\text{в}}$  – діаметр волокон структури, м;  $l_{\text{в}}$  – довжина волокон структури, м.

Якщо  $Re = 120 \dots 500$ ,

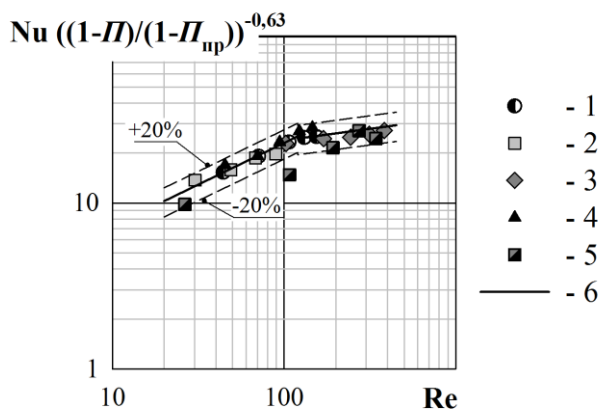
$$Nu_{h \rightarrow \infty} = 12,5 \cdot Re^m \cdot \left( \frac{1 - \Pi_{\text{пр}}}{1 - \Pi} \right)^{0,63}, \quad (8)$$

де  $m = 0,16 \dots 0,2$ .

В якості визначального розміру у числах Нусельта та Рейнольдса в (5)-(8) використано ефективний діаметр пор (V.M. Baturkin):

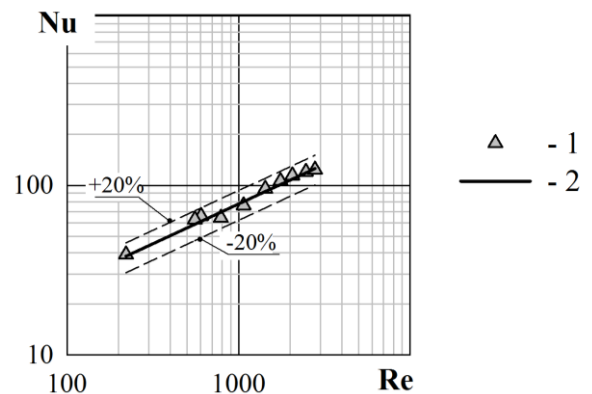
$$d_{\text{еф}} = \frac{0,4 \cdot d_{\text{в}}^{0,7} \cdot l_{\text{в}}^{0,3} \cdot \Pi^{1,6}}{\sqrt{1 - \Pi}} \quad (9)$$

Залежності (5)-(8) узагальнюють близько 90% дослідних даних із середнім відхиленням не більше  $\pm 20\%$ . Максимальне відхилення не перевищує 20%. Порівняння результатів розрахунків із експериментом представлено на рис. 22, 23.



згідно табл. 2: 1 – зразок №5; 2 – №7;  
3 – №4; 4 – №1; 5 – №10;  
6 – узагальнюючі залежності (6), (8)

Рис. 22. Порівняння експериментальних та розрахункових даних при кипінні на КС у великому об'ємі



1 – дослідні дані; 2 – розрахунок за (5)

Рис. 23. Порівняння експериментальних та розрахункових даних при кипінні на КС №4 при  $h=7,5$  мм

У п'ятому розділі наведено методику інженерного розрахунку двофазного теплопередаючого пристрою на прикладі парової камери (ПК). Сутність розрахунку полягає в визначенні інтегрального термічного опору ПК заданих геометричних розмірів при заданій підведеній потужності. Інтегральний термічний опір  $R_{\Sigma}$  ПК можна розрахувати, як суму чотирьох складових (рис. 24):

$$R_{\Sigma} = R_{\text{т/пр}}^{\text{зн}} + R_{\text{фп}}^{\text{зн}} + R_{\text{фп}}^{\text{зк}} + R_{\text{т/пр}}^{\text{зк}} \quad (10)$$

де  $R_{\text{т/пр}}^{\text{зн}}$  – термічний опір теплопровідності корпусу ПК в зоні нагріву, К/Вт;  $R_{\text{фп}}^{\text{зн}}$  – термічний опір фазового переходу в зоні нагріву ПК, К/Вт;  $R_{\text{фп}}^{\text{зк}}$  – термічний опір фазового переходу в зоні конденсації ПК, К/Вт;  $R_{\text{т/пр}}^{\text{зк}}$  – термічний опір теплопровідності корпусу ПК в зоні конденсації, К/Вт.

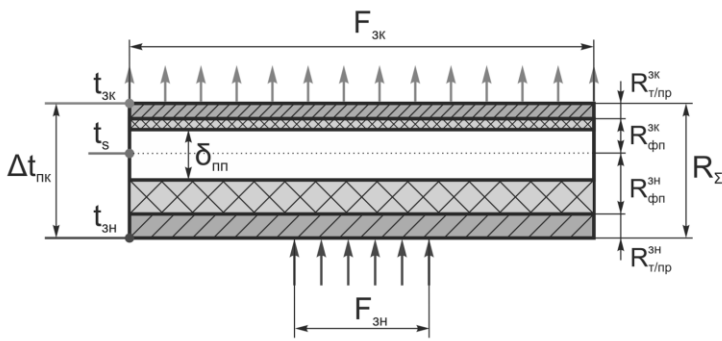


Рис. 24. До розрахунку термічного опору ПК

Термічним опором контакту пористих структур можна знехтувати, прийнявши до уваги, що пориста структура припікається до корпусу та кришки, що дозволяє досягти ідеального термічного контакту.

Термічний опір теплопровідності корпусу ПК в зоні нагріву визначається як:

$$R_{т/пр}^{3н} = \frac{\delta_k^{3н}}{\lambda_k \cdot F_{3н}}, \quad (11)$$

де  $\delta_k^{3н}$  - товщина корпусу камери в зоні нагріву, м;  $\lambda_k$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу корпусу, Вт/(м·К);  $F_{3н}$  – площа поверхні зони контакту із гріючим елементом, м<sup>2</sup>.

Термічний опір фазового переходу в зоні нагріву ПК визначається як:

$$R_{фп}^{3н} = \frac{1}{\alpha_{3н} \cdot F_{3н}}, \quad (12)$$

де  $\alpha_{3н}$  – інтенсивність теплообміну в зоні нагріву ПК, Вт/(м<sup>2</sup>·К), для розрахунку якого рекомендовані залежності (4)-(8).

Термічний опір фазового переходу в зоні конденсації ПК визначається як:

$$R_{фп}^{3к} = \frac{1}{\alpha_{3к} \cdot F_{3к}}, \quad (13)$$

де  $\alpha_{3к}$  – інтенсивність теплообміну в зоні конденсації ПК, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{3к}$  – площа поверхні зони конденсації, м<sup>2</sup>.

Інтенсивність теплообміну в зоні конденсації ПК визначається в залежності від її конструкційних особливостей. У випадку, коли на кришці відсутнє пористе покриття, для розрахунку  $\alpha_{3к}$  можуть бути рекомендовані залежності R.P. Stein. У випадку, коли на кришку ПК нанесена пориста структура, інтенсивність теплообміну при конденсації можна розрахувати, використовуючи залежності В.А. Іодіса.

Термічний опір кришки ПК в зоні конденсації визначається як

$$R_{т/пр}^{3к} = \frac{\delta_k^{3к}}{\lambda_{кр} \cdot F_{3к}}, \quad (14)$$

де  $\delta_k^{3к}$  - товщина кришки камери в зоні конденсації, м;  $\lambda_{кр}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу кришки, Вт/(м·К).

Наведена методика є універсальною і може бути використана для розрахунку та оптимізації будь-яких двофазних теплопередавальних пристроїв, в тому числі, теплових труб та термосифонів. Алгоритм розрахунку термічного опору за даною методикою наведено на рис. 25.

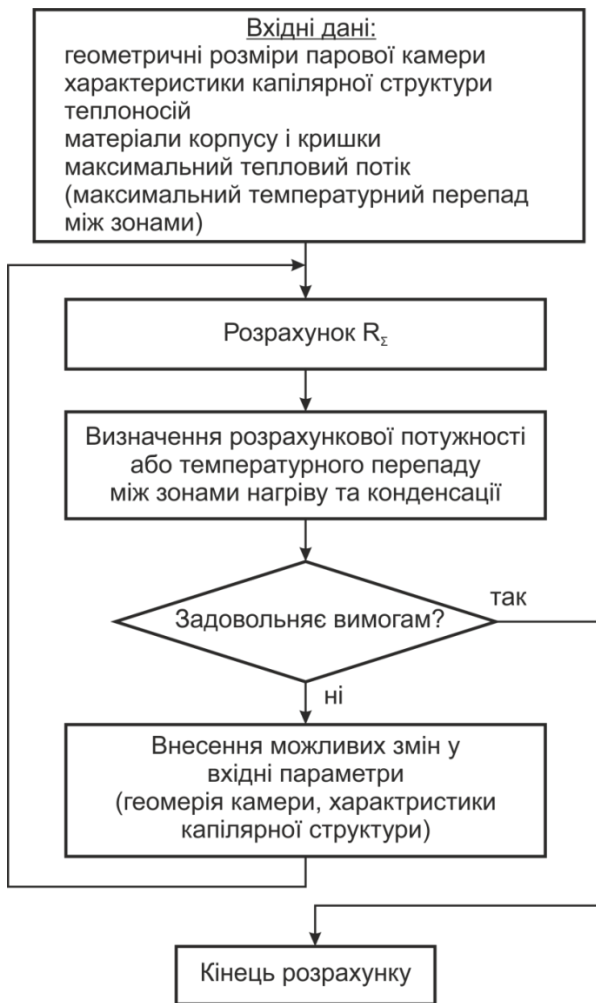
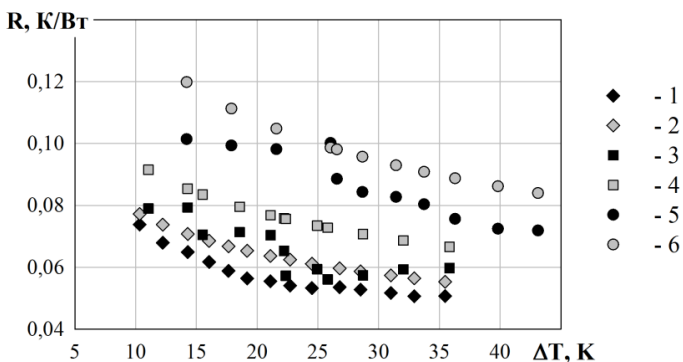


Рис. 25 Алгоритм розрахунку термічного опору парової камери



$\delta_{\text{КС}}^{\text{ЗН}}=0,4$  мм: 1 – експеримент; 2 – розрахунок;  
 $\delta_{\text{КС}}^{\text{ЗН}}=0,15$  мм: 3 – експеримент; 4 – розрахунок;  
 $\delta_{\text{КС}}^{\text{ЗН}}=0,18$  мм: 5 – експеримент; 6 – розрахунок

Рис. 26. Співставлення дослідних і розрахункових даних з термічного опору парових камер

спостерігатися і в зоні конденсації, адже характеристики КС на кришці можуть суттєво впливати на величину  $\alpha_{\text{ЗК}}$ , а формули з літератури враховують його не в повній мірі.

З метою перевірки та порівняння результатів, отриманих за представленою методикою із результатами для реальних конструкцій, було проведено дослідження термічного опору ПК.

Парові камери представляли собою прямий паралелепіпед з основою 70x70 мм. До нижньої частини корпусу припікалася пориста структура діаметром волокон 20 мкм, товщиною 0,13-0,4 мм та пористістю 86-89%. На кришку камер був нанесений шар такої ж КС товщиною 0,05 мм. В якості теплоносія були використані дистильована вода та метанол.

Камери були досліджені при таких умовах:

- потужність, що підводилася від 100 до 600 Вт;
- температура охолоджуючої рідини в конденсаторі від -25 до 100 °С;
- температура корпусу камери в зоні нагріву  $90 \pm 3$  °С.

Після проведення розрахунків за приведеною в роботі методикою, їх результати були співставленні з дослідними даними (рис. 26). Аналізуючи отримані

результати, можна зробити висновок про те, що при розрахунках отримані дещо завишені значення термічних опорів (в середньому на 7-12%), що, швидше за все, пов'язано з тим, що для розрахунку інтенсивностей теплообміну при кипінні і конденсації використані формули, які не враховують всю повноту явищ, що мають місце в реальних умовах. Так, формули (5)-(8) отримані для умов кипіння на затопленій КС, однак у паровій камері надлишку рідини не існує і можуть бути досягнуті більші значення  $\alpha_{\text{ЗН}}$ . Така ж ситуація може

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана комплексна задача фізичного обґрунтування високої інтенсивності теплообміну при кипінні на пористих структурах в умовах обмеженості зовнішнього простору.

Використання перевірених експериментальних методів досліджень дозволило отримати надійні результати, встановити вплив основних геометричних характеристик метало-волокнистих капілярних структур та режимних параметрів на інтенсивність теплообміну. Аналіз отриманих результатів дозволив розвинути фізичні уявлення про механізм тепломасопереносу при кипінні в умовах обмеженого простору, отримати емпіричні залежності для розрахунку інтенсивності теплообміну та розробити методику інженерного розрахунку двофазних теплопередавальних пристроїв.

Виконана комплексна багатопланова робота, за результатами якої можна зробити такі висновки.

1. Отримані нові результати щодо впливу висоти вільного простору та густини відведеного теплового потоку на перегрів поверхні теплообміну дозволили встановити, що при кипінні на гладких поверхнях він проявляється при висотах менше 10 мм. При цьому для поверхонь з пористим покриттям цей вплив проявляється вже при висотах  $h < 22,5$  мм (теплоносій - вода при атмосферному тиску).

2. Встановлено, що для пористих поверхонь зменшення висоти вільного простору може призвести до зниження інтенсивності тепловіддачі на 20-30% в порівнянні з кипінням на пористій структурі у великому об'ємі. При цьому при зменшенні висоти ( $h < 7,5$  мм) густини відведених теплових потоків збільшуються на 15-25%.

3. Отримані дані свідчать про те, що застосування пористого покриття призводить до інтенсифікації теплообміну у порівнянні з кипінням на гладкій поверхні в обмежених умовах у 2,5-4 рази.

4. Досліджено вплив ряду факторів на інтенсивність тепловіддачі при кипінні як на гладких, так і на пористих поверхнях:

а) зменшення діаметру гладкої тепловіддаючої поверхні від 5 мм до 0,8 мм в області густин теплових потоків  $q > 300$  кВт/м<sup>2</sup> призводить до збільшення інтенсивності тепловіддачі при кипінні у 1,3-2 рази;

б) збільшення діаметру волокон капілярної структури від 20 мкм до 50 мкм призводить до інтенсифікації процесу кипіння на 25-30%;

в) виявлено наявність оптимальної довжини волокон, при якій спостерігається найбільш інтенсивне відведення теплоти;

г) збільшення пористості капілярної структури при незмінності інших параметрів від 65% до 85% призводить до зниження інтенсивності теплообміну при кипінні на КС в 1,5 рази.

5. В результаті аналізу та узагальненню результатів досліджень уточнено та розвинуто фізичну модель процесу кипіння на пористих поверхнях в умовах обмеженого простору. Модель охоплює три основні випадки тепломасопереносу розглянутого процесу, а саме: вільноконвективний теплообмін; кипіння на пористій структурі в умовах її затоплення теплоносієм при відсутності і наявності впливу

парового утворення у верхній частині робочого простору; кипіння у пористій структурі в умовах капілярного транспорту теплоносія.

6. Отримані результати з інтенсивності теплообміну при кипінні на поверхні малого розміру у великому об'ємі та в обмежених умовах дозволили отримати узагальнюючі критеріальні залежності для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в залежності від густини відведеного теплового потоку, діаметра поверхні, теплофізичних властивостей теплоносія, а також висоти вільного простору. Залежності можуть бути використані для поверхонь теплообміну діаметром від 0,8 до 5,0 мм в діапазоні густин теплових потоків від  $3,1 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> до  $7,4 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> при кипінні на них очищеної води та в діапазоні теплових потоків  $2,7 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> до  $1,3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> при кипінні етилового спирту, в діапазоні висот від 2 до 10 мм. Середнє відхилення розрахункових даних для інтенсивності тепловіддачі при кипінні на поверхні малого розміру не перевищує  $\pm 12\%$ .

7. Вперше отримані залежності, які дозволяють розрахувати інтенсивність теплообміну при кипінні води на пористих поверхнях в умовах обмеженого простору та у великому об'ємі. Вони можуть бути використані для чисел Рейнольдса від 10 до 450 для метало-волокнистих капілярних структур товщиною 0,7-1,0 мм та пористістю 65-85% в діапазоні відстаней між поверхнею КПС та верхньою стінкою від 5 до 22,5 мм. Розбіжність між дослідними та розрахунковими даними не перевищує 20%.

8. Розроблена методика інженерного розрахунку дозволяє спроектувати двофазні теплопередавальні пристрої для забезпечення необхідного температурного режиму охолоджуваного об'єкту (тепловиділяючий елемент радіоелектронного пристрою, космічного апарату, комп'ютерного обладнання тощо) при заданому рівні його теплового навантаження.

Результати роботи використані ПП «НВФ Теплові Технології» при розробці систем охолодження для електронних модулів космічного апарату «MASCOT», а також застосовуються в навчальному процесі теплоенергетичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського при підготовці студентів спеціальності 144 Теплоенергетика.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### **- статті у наукових фахових виданнях України:**

1. Кравец В.Ю., Алексеїк О.С., Копчевская И.А. Интенсивность теплоотдачи при кипении на поверхности малого размера. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2012. №1, с. 49-53.

*Здобувач приймала участь у розробці конструкції дослідного стенду та робочих зразків, виконував експериментальні дослідження та проводив розрахунок значень коефіцієнтів тепловіддачі.*

2. Кравец В. Ю., Алексеїк О.С. Влияние стесненных условий на интенсивность теплоотдачи при кипении на пористой поверхности. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2012. №4/8 (58), с. 24-27.

*Здобувачем були виготовлені зразки досліджуваних пористих структур, проведені експериментальні дослідження. Також здобувач приймала участь в обробці та аналізі отриманих експериментальних даних.*



3. Кравець В. Ю., Алексеїк О.С. Фізична модель процесу кипіння на пористій поверхні в обмежених умовах. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2013. №4/8 (64), с. 26-31.

*Здобувач приймала участь у аналізі дослідних даних та розробці фізичної моделі кипіння. Нею було запропоновано виділяти три режими теплопереносу. Крім цього, здобувач виконала математичний опис приведених моделей.*

4. Кравец В.Ю., Алексеїк О.С. Теплоотдача при кипении на гладких и пористых поверхностях в условиях ограниченного объема. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2014. №1/8 (67), с. 3-6.

*Здобувач приймала участь в обробці і аналізі експериментальних даних. Також здобувачем були отримані узагальнюючі залежності.*

5. Кравец В.Ю., Лебедь Н.Л., Алексеїк О.С., Баскова А.А. Влияние свойств капиллярной структуры на интенсивность теплоотдачи при кипении в ограниченном объеме. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. №2 (8), с. 42-46.

*Здобувачем були проведені експериментальні дослідження. Також здобувач приймала участь в обробці та аналізі отриманих дослідних даних.*

**- статті у виданнях іноземних держав:**

6. V.Y. Kravets, O.S. Alekseik. Boiling Heat-Transfer Intensity on Small-Scale Surface. *International Review of Mechanical Ingeneering*. 2012. Vol. 6 N. 3, Part A., PP. 479-484. (CSA/CIG, **(SCOPUS)**)

*Здобувачем було проведено експериментальні дослідження на воді та етанолі, проведено розрахунок інтенсивностей тепловіддачі при кипінні на поверхні розміром 1,73 мм та отримано узагальнюючу емпіричну залежність для визначення інтенсивності тепловіддачі.*

7. V. Kravets, Ye. Alekseik, O. Alekseik S. Khairnasov, V. Baturkin, T. Ho, L. Celotti. Heat pipes with variable thermal conductance property for space applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017. #6(31), PP. 2613-2620. (**SCOPUS.**)

*Здобувач приймала участь у розробці теплових труб та їх експериментальних дослідженнях.*

**- статті в інших виданнях:**

8. Алексеїк О.С. Влияние характеристик пористой структуры на интенсивность кипения в тепловой трубе. *Технологічний аудит та резерви виробництва. Наукові підсумки*. 2013. № 6/5 (14), с. 29-31.

**- тези доповідей та матеріали конференцій:**

9. Кравец В.Ю., Алексеїк О.С. Интенсивность теплоотдачи при кипении на развитых поверхностях теплообмена. «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». зб. тез доп. VIII міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 2010. (м. Київ, 22 – 25.04.2010 р.) С. 94

*Здобувачем були проведені експериментальні дослідження, проведено обробку та аналіз результатів*

10. Кравец В.Ю., Алексеїк О.С. Кипение на поверхности малого размера. «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». зб. тез доп. ІХ міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 2011. (м. Київ, 22 – 25.04.2011 р.) С. 125

*Здобувачем були проведені експериментальні дослідження процесу кипіння на гладких поверхнях розміром 1,73 мм і 0,88 мм, проведено обробку та аналіз результатів*

11. Кравец В.Ю., Алексеїк О.С. Интенсивность теплоотдачи при кипении на поверхности малого размера. «Современные информационные и электронные технологии» зб. тез доп. ХІІ міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 2011 (м. Київ, 22 – 25.04.2011 р.) с. 227

*Здобувачем були проведені обробка та аналіз дослідних даних, отримана емпірична залежність для розрахунку інтенсивності тепловіддачі при кипінні води на поверхні малого розміру у великому об'ємі.*

12. Кравец В.Ю., Алексеїк О.С. Исследование интенсивности теплоотдачи в зоне нагрева миниатюрной тепловой трубы. «Современные информационные и электронные технологии» зб. тез доп. ХІІ міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 2012 (м. Київ, 22 – 25.04.2012 р.) с. 207

*Здобувачем були проведені дослідження теплоперадвальних характеристик мініатюрних теплових труб, проведено обробку та аналіз отриманих даних, розраховано інтенсивності тепловіддачі у зоні нагріву.*

13. Алексеїк О.С., Лебедь Н.Л., Баскова О.О. Влияние ограниченных условий на интенсивность теплообмена при кипении на гладких горизонтальных поверхностях. «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». зб. тез доп. ХІ міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 2013. (м. Київ, 22 – 25.04.2013 р.) С. 125

*Здобувачем проведені експериментальні дослідження, отримано емпіричну залежність для розрахунку інтенсивності тепловіддачі при кипінні на гладкій поверхні в умовах обмеженого простору*

14. Кравец В.Ю., Хайрнасов С.М., Алексеїк Е.С., Алексеїк О.С., Мельник Р.С. Влияние характеристик пористой структуры на теплопередающие способности миниатюрных тепловых труб. «Современные информационные и электронные технологии» зб. тез доп. ХV міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 2014 (м. Київ, 22 – 25.04.2014 р.) с.

*Здобувачем приймав участь у виготовленні дослідних зразків. Нею були проведені обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень.*

15. V. Kravets, Ye. Aleksei, O. Aleksei, S. Khairnasov, V. Baturkin, T. Ho, L. Celotti. Heat pipes with variable thermal conductance property developed for space. *Joint 18th IHPC and 12th IHPS*; Jeju, Korea; 16.06.2016

*Здобувачем приймав участь у підборі параметрів теплових труб на основі інженерних розрахунків, їх експериментальних дослідженнях та обробці даних.*

16. Кравец В.Ю., Коньшин В.И., Алексеїк Е.С., Алексеїк О.С., Мельник Р.С. Система обеспечения температурного режима электронного блока космического зонда. *Сб. трудов XIX Межд. научно-практической конф.: Современные информационные и электронные технологии*, Одесса, 28 мая – 1 июня, 2018, с. 95-96.

*Здобувач приймала участь у створенні системи, проводила аналіз даних.*

17. Алексеїк О.С., Михайлик В.Ю. Система охолодження електронних елементів ноутбука на основі теплових труб; . *XVII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики»*, Київ, 2019, с. 108.

*Здобувач приймала участь у розрахунках елементів системи охолодження, використовуючи отримані нею залежності.*

18. Алексеїк О.С., Царенко В.О. Охолодження комп'ютерної техніки за допомогою теплових труб; . *XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики»*, Київ, 2020, с. 105.

*Здобувач приймала участь у розрахунках теплових труб, використовуючи отримані нею залежності для визначення інтенсивності теплообміну при кипінні на пористих структурах.*

## АНОТАЦІЯ

**Алексеїк О.С. Теплообмін при кипінні на гладких та пористих поверхнях в умовах обмеженого простору.** - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вивченню закономірностей та характеристик процесу теплообміну при кипінні на метало-волокнистих пористих поверхнях в умовах обмеження простору над поверхнею теплообміну.

У роботі виконані комплексні експериментальні дослідження інтенсивності теплообміну при кипінні на пористих структурах, встановлено вплив на неї розмірів волокон, пористості та товщини пористого покриття, а також висоти вільного простору над поверхнею теплообміну.

Розвинуто фізичну модель процесу тепломасопереносу при кипінні на пористих поверхнях в умовах обмеженого простору. Отримані емпіричні залежності для визначення інтенсивності теплообміну при кипінні на гладких та пористих поверхнях в умовах обмеженості простору із врахуванням характеристик пористої структури в широкому діапазоні підведених теплових потоків.

Розроблена методика інженерного розрахунку двофазного теплопередавального пристрою на прикладі парової камери.

**Ключові слова:** Двофазна система, кипіння, інтенсивність теплообміну, метало-волокнисті структури, обмежений простір, парова камера, пориста структура, фазове перетворення, фізична модель.

## ANNOTATION

**Alekseik O.S. Heat transfer at boiling on smooth and porous surfaces in conditions of limited space.** – The manuscript.

The dissertation for the degree of the candidate of technical sciences (PhD) on a specialty 05.14.06 “Technical thermal physics and industrial heat-power engineering”. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” MES of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is dedicated to studying of patterns and characteristics of heat transfer process at boiling on felt metal porous surfaces in conditions of limited space above the heat transfer surface. Complex experimental investigation of heat transfer intensity at boiling on porous structures was performed in this work, influence of felt sizes, porosity, structure thickness and height of free space above the heat transfer surface on heat transfer intensity was detected.

The active development of the electronics, computer, energy and many other industries requires the development of new, more efficient methods of heat dissipation from heat loaded elements. The coating of the cooled surface with capillary structures is one of such methods.

Applying a capillary-porous coating on the heat transfer surface can significantly increase the intensity of heat transfer during boiling and in most cases increase the maximum allowable heat flux density compared to smooth technical surfaces.

Coating of porous structures is widely used in the elements of cooling systems of electronic, space equipment, power plants and other. In particular, they are used as wicks in various types of heat pipes, as well as in vapor chambers. However, the boiling of the heat carrier in such devices occurs in a limited space above the heat transfer surface, which has a significant impact on the processes of heat and mass transfer, and the intensity of heat transfer. Existing dependences for calculating the heat transfer coefficient at boiling on porous surfaces have been obtained for large volume conditions. Therefore, attempts to use them to calculate the intensity of heat transfer in the heating zone of two-phase heat transfer devices give a significant error, which complicates the design process of such devices. Hence the studying of the processes of boiling on porous structures in a limited volume is an actual task.

Analysis of the literature has shown that there is no single theory for the case of boiling on the capillary structure, which would explain the full range of phenomena that occur. In addition, the results reported in the literature for some types of porous coatings are not enough to be able to unambiguously establish the nature of the influence of a factor on the intensity of the boiling process in a porous coating. There are almost no data on boiling in the capillary structure in conditions of the heat carrier capillary transport and at limited space.

In dissertation thesis design of working chamber and main systems of experimental setup: system of creation and maintaining of constant conditions of experiments, system of supplying and measuring of heat load and system of data acquisition are described. Description of working elements of three types: for boiling investigation on small smooth surfaces (I type), on large smooth surfaces (II type), on large porous surfaces (III type) is presented. Characteristics of investigated porous structures are listed. Method of

experimental data processing is described. Results of experimental investigation errors evaluation are presented. In order to check reliability of research methods comparison of obtained experimental data with literature data was performed.

Results of experimental investigation of heat transfer intensity in dependence on the output heat flux, surface sizes and covering characteristics (such as fibrous sizes, porosity and thickness) and also height of free volume of liquid above the surface are presented. It was shown that influence of space limiting on heat transfer intensity at boiling on the smooth surface takes place at heights less than  $4 \cdot l_c$  (where  $l_c$  – capillary constant). And character of this influence depends on density of output heat flux. At the same time, obtained experimental data have shown that for porous structures this value is equal to  $(7-9) \cdot l_c$  and depends on felt sizes and its porosity. It was found that decreasing of distance between porous and limiting surfaces can lead to decreasing of heat transfer intensity on 20-30% compared to boiling on porous surface in a large volume. Comparison of obtained data has shown that application of porous surface leads to 1,5-3 times increasing of heat transfer intensity compared to boiling on the smooth surface at the same conditions.

Also, physical model of heat transfer at boiling on porous surface at conditions of limited space is presented. Four basic regimes of heat transfer were pointed out in dependence of intensity of heat input and distance between porous and limiting surfaces: free convective heat transfer; boiling on porous surface at conditions of its flooding with heat carrier and absence influence of vapor cloud at the top part of the working space and with presence of this influence; boiling on porous structure at conditions of heat carrier capillary transport. A physical description of heat and mass transfer processes is made for all regimes.

The results of generalization of experimental data on heat transfer intensity at boiling on porous surface are also presented in this chapter. Obtained equations allow estimation of heat transfer coefficient in dependence of heat flux, height of volume under heat transfer surface and some characteristics of capillary structure. Mean deviation of estimated data from experimental ones is equal to 15%.

Method of engineering calculation of a two-phase heat transfer devices was developed. Recommendations for choosing of calculation equations of such devices depending on features of their designs and mode parameters are given. Main criterion equations recommended for evaluation of separate components of overall thermal resistance are presented. Description of experimental setup for heat transfer characteristics of vapor chambers and experimental method is given. Comparison of the calculation results and experimental data for thermal resistance obtained for the actual designs of vapor chambers has shown that these values differ from each other not more than 12%.

**Key words:** Two-phase system, boiling, heat transfer coefficient, felt metal structures, limited space, vapor chamber, porous structure, phase change, physical model.