

**Коваленко Г.В.**

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

## ТЕПЛОВІДДАЧА ПІД ЧАС НЕСТАЦІОНАРНОГО НУКЛЕАТИВНОГО КИПІННЯ НАНОРІДИН ІЗ МАЛОТЕПЛОПРОВІДНОЮ ТВЕРДОЮ ФАЗОЮ

Стаття присвячена тепловіддачі під час нуклеативного (бульбашкового) нестационарного кипіння нанорідин, створених на основі дистильованої води. Речовиною твердої фази були частинки як із високою теплопровідністю (розчини коларголу), так і з низькою теплопровідністю (аеросил, рутил, розширений графіт). У серії дослідів вагові концентрації твердої фази були в діапазоні від нуля до 3%. У всіх експериментах пробний сталевий циліндр нагрівався в муфельній печі до однієї і тієї ж температури ( $\approx 526^{\circ}\text{C}$ ) і потім занурювався в посудину з нанорідиною, властивості якої досліджувались. При цьому реєструвались температури центра циліндра та його поверхні, а також початкова і кінцева температури охолоджуючої рідини. Для порівняння виконувались досліди з чистою дистильованою водою. Посудина з охолоджуючою рідиною була обладнана п'єзокерамічним сенсором звукових коливань, сигнал якого, переданий через аналого-цифровий перетворювач на комп'ютер, дозволяв фіксувати зміни характеру процесу охолодження пробного циліндра. Інтенсивність тепловіддачі при бульбашковому кипінні охолоджуючої нанорідини оцінювалась по середній швидкості остигання центра пробного циліндра.

Нанорідини, тверда складова яких мала розвинену поверхню, характеризувались збільшеним тепловим потоком. У нанорідинах з частинками срібла (коларгол) і рутилу при збільшенні концентрації твердої фази в діапазоні 0–1,6% спостерігалось зменшення інтенсивності тепловіддачі. Залежність швидкості остигання пробного циліндра від концентрації твердої фази для нанорідини з розширеним графітом характеризується максимумом при концентрації 0,25%. Велика швидкість остигання сталевго циліндра при нуклеативному кипінні була зафіксована в дослідах з використанням в якості твердої складової аеросилу і розширеного графіту. Обидві останні речовини характеризуються малим коефіцієнтом теплопровідності і великою питомою поверхнею.

**Ключові слова:** бульбашкове кипіння нанорідин, нанорідини з твердими частками з низькою теплопровідністю.

**Постановка проблеми.** Суспензії, які містять тверді частинки з розміром меншим ніж 100 нм (нанорідини), звернули на себе увагу, коли з'ясувалося, що вони мають аномально високу теплопровідність при малих об'ємних частках твердої фракції [1]. Ця їх властивість зробила використання нанорідин перспективним в хімії, електроніці, медицині, енергетиці, при захисті навколишнього середовища.

Наночасточки дозволяють значно збільшити тепловіддачу однофазної рідини [2; 3]. Під час кипіння нанорідин виявлено значне збільшення коефіцієнта тепловіддачі і критичного теплового потоку [4].

Однак відносно теплообміну під час кипіння нанорідин існують дві групи експериментальних даних. Так, експерименти з наночастинками  $\text{CuO}$  в воді [5] показали, що при бульбашковому кипінні коефіцієнт тепловіддачі і критичний тепловий потік збільшуються разом із зростанням масової концентрації наночастинки до 1%. При більших

концентраціях наночастинки тепловіддача погіршується.

У роботах Дерягина [6] ці явища пояснюються нестійкістю дисперсних систем. Нанорідини утворюються часточками, які складаються з невизначеної (часто великої) кількості молекул. У порівнянні з розчинами такі системи мають додатковий ступінь свободи і їх стабільність може мінятися способами не властивими «справжнім» розчинам.

Відомі три види стабільності колоїдних систем:

1. Фазова стабільність – стійкість до розшарування.
2. Стабільність дисперсного складу (незмінність розподілу частинок по розмірам).
3. Агрегативна стабільність (відсутність коагуляції), яка можлива через те, що сили взаємодії між молекулами мають радіус дії більший, ніж відстань між молекулами.

Класичні моделі для суспензій (Einstein, Nielsen) погано прогнозують в'язкість нанорідин.

Автори [7] пояснюють деякі особливості плівкового кипіння нанорідин, зокрема накопичення наночастинок на поверхні нагрівання, з урахуванням броунівського і термофоретичного механізмів дифузії.

Наночастинки благородних металів (зокрема срібла) самі по собі схильні до агломерації. Для підвищення стійкості суспензій з такими частками використовують різні диспергенти. Ці речовини створюють на поверхні наночастинок поверхневі заряди, що призводить до відмінності у властивостях нанорідин [2] у різних дослідників. Це може бути причиною розбіжностей їх характеристик.

Предметом дослідження в царині нанорідин є наявність (або відсутність) критичного розміру твердих частинок, вплив фізичних характеристик твердої фази на специфічні ефекти.

Максимальне збільшення критичного теплового потоку під час кипіння нанорідин становить 300–450%. Обнадійливі властивості нанорідин покращують перспективи їх застосування в таких галузях теплотехніки, як теплові труби або загартовування металевих деталей.

Таким чином, дослідження нестационарного кипіння нанорідин в широкому температурному діапазоні, при охолодженні нагрітої металеві деталі є актуальним.

**Постановка завдання.** Основним завданням роботи є накопичення експериментальних даних в області кипіння нанорідин. Одночасна фіксація додаткових параметрів дослідів – звуку, який виникає при зміні характеру теплообміну, дозволяє зв'язати між собою окремі характеристики цього складного явища.

**Матеріали і методи.** Схема експериментального стенду показана на рис. 1.

Для експериментів використовувався циліндр з нержавіючої сталі 1Х18Н9Т з наступними розмірами – діаметр циліндру – 15 мм, висота циліндру – 40,0 мм, радіус закруглення між циліндричною поверхнею і торцем – 0,1 мм. По осі циліндру на глибину половини його висоти висвердлювався канал діаметром 1 мм. У канал запресовувалася хромель-алюмелева термопара. Гарячий спай термопари приварювали до дна каналу контактним зварюванням.

До бокової поверхні циліндру на середині його висоти приварювався розплесканий спай другої хромель-алюмелевої термопари (зовнішньої) і місце зварювання зашліфовувалось. Холодні спаї обох термопар термостабілізувались.

Перед кожним дослідом циліндр з термопарами поміщалися в муфельну піч, для нагрівання до початкової температури (526°C). Після достатньої витримки циліндр з термопарами виймався з печі і занурювалися в керамічну посудину з охолоджуючою рідиною, що досліджувалась.

Для фіксації звуку, що виникає під час кипіння до бокової стінки посудини з охолоджуючою рідиною спеціальним кріпленням притискався п'єзокерамічний сенсор.

Сигнали термопар, що вимірювали температури в центрі циліндра і на зовнішній поверхні, а також звуковий сигнал подавалися через аналого-цифровий перетворювач на комп'ютер і на частотомір.

Запис на комп'ютері температур в центрі циліндра і на його поверхні давала можливість розв'язувати зворотну задачу теплообміну.

Характерна зміна звукового і температурного сигналів вказувала на початок і кінець нуклеативного кипіння.

Властивості наповнювачів нанорідин зведені в таблицю 1.

Були досліджені процеси нестационарного кипіння наступних нанорідин, утворених на основі дистильованої води з 1. аеросилом –  $\text{SiO}_2$ ; 2 розширеним графітом – G; 3. рутилом -  $\text{TiO}_2$ ; 4. коларголом (колоїдне срібло Ag); Швидкість охо-

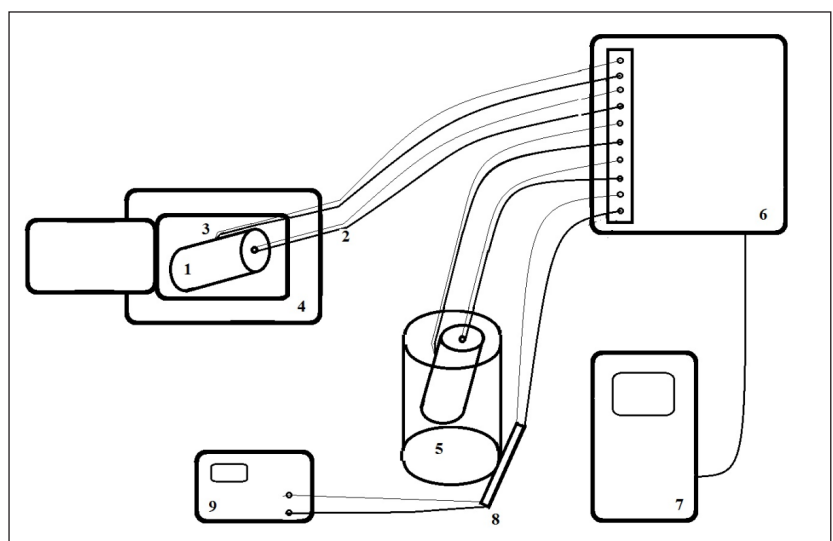


Рис. 1. Схема експериментального стенду: 1- пробний циліндр; 2- центральна термопара; 3- зовнішня термопара; 4 – муфельна піч; 5- посудина з досліджуваною рідиною; 6- аналого-цифровий перетворювач; 7- комп'ютер; 8- п'єзокерамічний сенсор; 9- частотомір

лодження центра дослідного циліндра в різних нанорідинах показана на рис. 2. Для порівняння виконувались досліди з дистильованою водою.

У процесі охолодження циліндра можна виділити чотири зони. Утворення нестационарної плівки, що кипить. У наведеному досліді вона існує 2,4 секунди. Далі поверхню циліндра огортає майже суцільна парова плівка, поверхня якої вібрає, але контакт з нагрітим металом циліндра відбувається рідко. Циліндр остигає, тепловий потік від його поверхні до рідини зменшується і, нарешті (через 11,8 секунди від початку досліді), досягає критичного, і плівкове кипіння переходить в нуклеативне (бульбашкове). Окремі бульбашки інтенсивно перемішують рідину біля металевої поверхні і інтенсивність теплообміну збільшується в рази. Бульбашкове кипіння продовжується 1,4 секунди і завершується конвективним теплообміном. За характеристику середньої інтенсивності теплообміну при бульбашковому кипінні вибиралось відношення різниці температур початку і кінця бульбашкового кипіння до

інтервалу часу його існування BbV. Кут нахилу кривої TC від часу свідчить про значне зростання середнього теплообміну в період бульбашкового кипіння. Зміна характеру теплообміну відзначається різким збільшенням амплітуди BbV звукового сигналу, який формується (скоріш за все) в момент руйнації парової бульбашки.

Швидкість охолодження центра дослідного циліндра при бульбашковому кипінні різних нанорідин показано на рис. 2. Найбільша швидкість охолодження була досягнута в водній суспензії аеросилу з концентрацією 1,2%. (вагових). Збільшення швидкості охолодження в порівнянні з процесом в дистильованій воді становило 3,92 рази. Результати експериментів з дистильованою водою добре узгоджувались з даними комп'ютерних розрахунків з [8]. Швидкості охолодження при бульбашковому кипінні розчинів коларголу і рутилу порівняно мало відрізняються від швидкості охолодження під час кипіння дистильованої води. Причому в діапазоні концентрацій від 0% до 1,8% мають схильність до зменшення з ростом концен-

Таблиця 1

Властивості речовин твердої фази суспензій

№	Назва, формула	Розміри частинок, нм	Питома поверхня, БЕТ; м <sup>2</sup> /г	Питома маса, г/см <sup>3</sup>	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К)
1	Аеросил, SiO <sub>2</sub>	10-40 5-15	50-380	2,2	1,76
2	Розширений графіт, С	0,70-0,72	220-250	1,6	3-5 поперек листа 130-200 вздовж листа
3	Рутил, TiO <sub>2</sub>	42		4,3	22,06
4	Коларгол, Ag	3,3-4,8		10,5	429

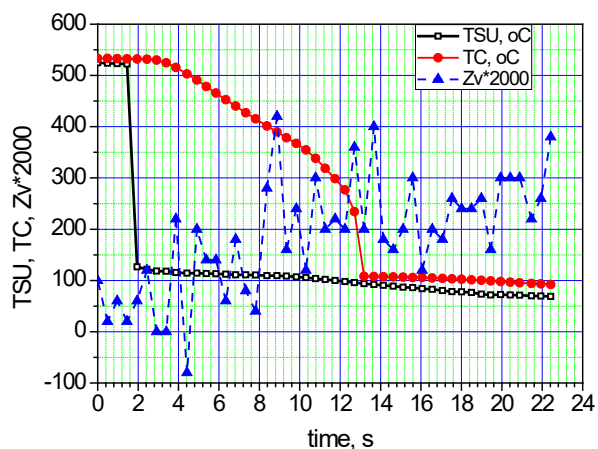


Рис. 2. Процес охолодження сталого циліндра в розчині аеросилу з концентрацією C=0,928%  
 TSU – температура на поверхні циліндра,  
 TC – температура в центрі циліндра,  
 Zv\*2000 - звуковий сигнал, що супроводжує кипіння

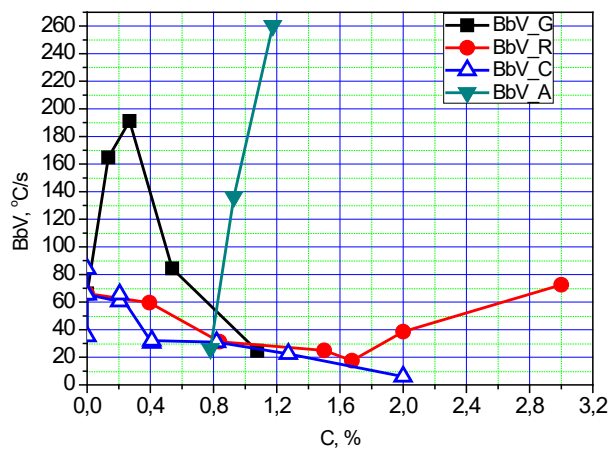


Рис. 3 Швидкість охолодження центра дослідного циліндра під час бульбашкового кипіння різних нанорідин, що містять:  
 BbV\_G – графіт розширений, BbV\_R – рутил,  
 BbV\_C - коларгол; BbV\_A – аеросил

трації. Чіткого впливу концентрації добавок на поверхневий натяг нанорідини не виявлено. А от питома поверхня БЕТ, яка у деяких речовин відрізняється на порядок, може бути причиною значної відмінності процесів бульбашкового кипіння. У розширеного графіту БЕТ=350м<sup>2</sup>/г, у деяких сортів аеросилу БЕТ досягає 380 м<sup>2</sup>/г.

Збільшення концентрації речовини з великою питомою поверхнею можна помітити по зростанню амплітуди звукового сигналу під час кипіння. Свій вклад в «нестандартність» впливу на теплообмін вносить анізотропія теплопровідності. У розширеного графіту вона залежно від напрямку може перевершувати 60 разів.

Не виключено, що позитивний вплив аеросилу на розширення зони бульбашкового кипіння можна пояснити вдалим поєднанням малих роз-

мірів його часточок і дуже низькою теплопровідністю. Крім того, в нього добрі адсорбційні властивості, особливо до полярних речовин.

**Висновки.** Нанорідини є перспективними теплоносіями в різних галузях техніки.

Область застосування нанорідин не повинна обмежуватися конвективним теплообміном, де вони вже довели свої унікальні властивості, але може бути розширена на процеси їх кипіння.

У разі якщо вдасться налагодити виробництво стійких нанорідин (наприклад з використанням аеросилу), їх застосування можливе в процесах загартування і в теплових трубах, тому що інтенсифікація теплообміну, викликана присутністю в рідині наночастинок превалює над зменшенням поверхневого натягу, необхідного для пересування рідини в гнотових системах.

#### Список літератури:

1. L. Godson, B. Raja, D. Mohan Lal, S. Wongwises, Enhancement of heat transfer using nanofluids – an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol.14. Pp. 629–641.
2. Y. Wenhua, D. M. France, J. L. Routbort, and S.U.S. Choi, Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements, *Heat Transfer Eng.* 29 (2008) 432–460.
3. P. Keblinski, S.R. Phillpot, S.U.S. Choi, J.A. Eastman, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *Int. J. Heat Mass Transfer* 45 (2002) 855–863.
4. Б.И. Бондаренко, В.Н. Морару, С.В. Сидоренко, Д.В. Комыш, А.И. Ховавко, Наножидкости для энергетики: влияние стабилизации на критический тепловой поток при кипении, *Письма в ЖТФ*, 2012, том 38, вып. 18. Стр. 68–81.
5. W. M. Rohsenow, A method of correlating heat transfer data for surface boiling liquids // *Transactions of ASME* 74 (1952) 969–979.
6. Б.В. Дерягин Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. Москва : Наука, 1986. 206 с.
7. A. A. Avramenko, I. V. Shevchuk, A. I. Tyrinov, D. G. Blinov, Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015. V. 92. C. 106–118.
8. G. V. Kovalenko, N. I. Kobasko, Modeling of the Unsteady-State Boiling Process in Water Quenching of Metals. *Heat Transfer-Soviet Research*, Vol. 20, 1, January-February 1988. P. 69–78.

#### **Kovalenko G.V. HEAT TRANSFER ON NON-STATIONARY NUCLEATIVE BOILING OF NANOFLUIDS WITH A SOLID PHASE HAVING A LOW HEAT CONDUCTIVITY**

*The paper is dedicated to heat transfer at the nucleative (bubble) unsteady boiling of nanofluids made from distilled water. The solid phase substance consisted of both particles with a high thermal conductivity (collargol solutions) and a low thermal conductivity (aerosil, rutile, expanded graphite). The weight concentrations of the solid phase were in the range from 0% to 3%. In all experiments, the test steel cylinder was heated to the same temperature ( $\approx 526^\circ\text{C}$ ) in the muffle furnace and then immersed in the vessel with the nanofluent, the properties of which were investigated. The temperature of the center of the cylinder and its surface, as well as the initial and final temperature of the coolant were recorded. For comparison, experiments were carried out with the pure distilled water. The coolant vessel was equipped with a piezoceramic sensor whose signal transmitted through an analog-to-digital converter to the computer was able to fix changes in the character of the cooling process of the tested cylinder. The intensity of heat transfer during the bubble boiling of the cooling nanofluid was estimated by the average cooling rate of the center of the tested cylinder.*

*The nanofluids the solid component of which had developed surfaces were characterized by increased heat flux. A decrease in heat transfer intensity was observed in nanofluids with silver (collargol) and rutile particles while increasing the solid phase concentration in the range 0 – 1.6%. The dependence of the cooling rate of the tested cylinder on the concentration of the solid phase for nanofluid with expanded graphite was characterized by a maximum at a concentration 0.25%. The both latter substances were characterized by a low coefficient of thermal conductivity and a large specific surface area.*

**Key words:** nucleate boiling of nanofluids, nanofluids with solid particles with low heat conductivity.