

Автореферат  
H65

Н

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**НІКУЛІН АРТЕМ ГЕННАДІЙОВИЧ**



УДК 535.36+536.24+544.77

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ КИПІННЯ  
НАНОФЛЮЇДІВ У ВІЛЬНОМУ ОБ'ЄМІ  
(Експеримент, моделювання)**

Спеціальність 05.14.06 -Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій (ОНАХТ) Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, доцент  
**Семенюк Юрій Володимирович,**  
в.о. зав. кафедри теплофізики та прикладної екології Одеської національної академії харчових технологій МОН України.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Калінчак Валерій Володимирович,**  
завідувач кафедри теплофізики Одеського національного університету імені І.І. Мечникова МОН України.

доктор технічних наук, професор  
**Потапов Володимир Олексійович,**  
завідувач кафедри холодильної та торговельної техніки Харківського державного університету харчування та торгівлі МОН України.

Захист дисертації відбудеться "25" травня 2015 р. о 13<sup>00</sup> г. в ауд. 108 на засіданні  
аної вченої ради Д 41.088.03 в Одеській національній академії харчових технологій за  
ряняська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

на ознайомитися в бібліотеці ОНАХТ за адресою:  
Україна.

2015 року.

**Мілованов В.І.**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Кипіння є найефективнішим процесом передачі теплоти в різному устаткуванні. Інтенсивність кипіння робочих тіл визначає ефективність теплообмінних апаратів холодильних машин, теплових насосів і теплових труб. Одним із сучасних методів інтенсифікації теплообміну є застосування нових робочих тіл з більш досконалими теплопередавальними властивостями, наприклад, нанофлюїдів (суспензій твердих частинок нанорозмірів - до 100 нм - у базовій рідині). В опублікованій інформації, присвяченій дослідженню кипіння нанофлюїдів, відзначається важливість вивчення впливу наночастинок на теплофізичні властивості базових рідин.

Слід підкреслити, що нанофлюїди належать до складних термодинамічних систем, оскільки складаються з компонентів, що значно різняться за своїми фізико-хімічними властивостями. При цьому суспензії наночастинок металів, оксидів, фулеренів, вуглецевих нанотрубок у базових рідинах, як правило, є термічно нестабільними гетерогенними колоїдними розчинами. Крім того, аж до теперішнього часу відсутні стандартні методики приготування стійких нанофлюїдів. Труднощі експериментального вивчення процесів кипіння нанофлюїдів пов'язані зі складністю створення стійких у часі суспензій, необхідністю оцінки впливу застосовуваних для їх стабілізації поверхнево-активних речовин (ПАР), взаємодією осідальних наночастинок з теплопередавальною поверхнею та ін.

Проблеми моделювання процесів кипіння нанофлюїдів значною мірою обумовлені обмеженим обсягом інформації про вплив наночастинок на фазові рівноваги, теплофізичні властивості базових рідин. В опублікованих статтях міститься вкрай мало даних про вплив наночастинок на характеристики тепловіддавальної поверхні. Існуючі на сьогодні моделі для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів справедливі лише для конкретних об'єктів дослідження «наночастинки-базова рідина-ПАР-тепловіддавальна поверхня». Наведені обставини обмежують можливості практичного впровадження нанотехнологій у промисловість.

Серед вчених, які плідно працювали в рамках зазначеного наукового напрямку, і на публікації яких автор спирався при вирішенні розглянутих у дисертації завдань, слід назвати імена таких вчених: Чої С.У.С. (Choi S.U.S.), Джерарді К. (Gerardi C.), Кедзієрський М.А. (Kedzierski M.A.), Том Дж.Р. (Thome J.R.), Толубінський В.І., Кім С.Дж. (Kim S.J.), Хао П. (Hao P.), Геллер В.З., Железний В.П., Шен Б. (Shen B.), Грол Е.А. (Groll E.A.), Смірнов Г.Ф., Данілова Г.Н. та ін.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до: Постанови Кабінету Міністрів України №256 від 04.03.2004 р., якою затверджено програму призупинення виробництва та використання озоноруйнівних речовин на 2004-2030 рр. Дисертаційна робота є також складовою частиною досліджень, проведених у рамках виконання науково-дослідної роботи МК 12/04, № держ. реєстр. 0112U000731, МК 14/01, № держ. реєстр. 0114U000073 та науково-дослідної теми кафедри теплофізики та прикладної екології ОНАХТ «Комплексні дослідження теплофізичних властивостей речовин, перспективних для використання в холодильній промисловості».

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є: дослідження особливостей кипіння нанофлюїдів у вільному об'ємі; визначення впливу домішок наночастинок на теплофізичні властивості базових рідин; розробка моделі кипіння нанофлюїдів у вільному об'ємі; надання методичних рекомендацій щодо дослідження процесів кипіння нанофлюїдів у вільному об'ємі.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені та вирішені такі завдання:

xv 785  
ІНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ  
БІБЛІОТЕКА

- розробити апаратуру і методики для приготування нанофлюїдів та визначення їх стійкості у часі;
- виконати експериментальні дослідження густини і поверхневих властивостей нанофлюїдів R11/XMI Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub> та ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і впливу наночастинок на ці властивості базових рідин;
- дослідити вплив шару наночастинок, що утворюється на поверхні нагрівача в процесі кипіння нанофлюїду, на крайовий кут змочування (для нанофлюїду ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);
- створити експериментальну установку для вивчення процесів кипіння розчинів і нанофлюїдів у вільному об'ємі і виконати дослідження впливу наночастинок TiO<sub>2</sub> на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні розчинів холодоагенту R11 з компресорним мастилом у вільному об'ємі, а також впливу наночастинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на коефіцієнт тепловіддачі та відривний діаметр бульбашок при кипінні ізопропанолу у вільному об'ємі;
- розробити модель для прогнозування коефіцієнта тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів у вільному об'ємі;
- розробити методичні рекомендації щодо дослідження кипіння нанофлюїдів у вільному об'ємі.

**Об'єкти дослідження** - суспензії наночастинок TiO<sub>2</sub> у розчинах компресорного мастила XMI Агрінол з холодоагентом R11 і суспензії наночастинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в ізопропанолі.

**Предмет дослідження** - закономірності зміни характеристик кипіння у вільному об'ємі розчинів холодоагент/мастило (PXM) і чистих речовин залежно від температури, густини теплового потоку і концентрації наночастинок; закономірності зміни поверхневих властивостей PXM і чистих речовин залежно від температури і концентрації наночастинок.

#### Методи дослідження:

- **експериментальні дослідження:** коефіцієнта тепловіддачі при кипінні PXM і нанофлюїдів у вільному об'ємі; стійкості нанофлюїдів у залежності від часу і температури; густини, тиску насиченої пари і поверхневого натягу PXM та нанофлюїдів; крайового кута змочування матеріалу нагрівача ізопропиловим спиртом.

- **теоретичні дослідження:** шляхом розвитку методів моделювання процесів теплообміну при кипінні нанофлюїдів у вільному об'ємі.

**Наукова новизна** виконаної роботи полягає в тому, що:

- вперше отримано експериментальні дані про коефіцієнт тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі нанофлюїдів R11/XMI Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub> та ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- отримано нові експериментальні дані про відривний діаметр бульбашок при кипінні ізопропанолу та нанофлюїду ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- вперше отримано дані щодо стійкості нанофлюїдів XMI Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub>, R11/XMI Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub> та ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а також про температурну залежність стійкості нанофлюїду ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- отримано нові експериментальні дані про поверхневий натяг і тиск насиченої пари нанофлюїдів R11/XMI Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub> та ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- показано, що використання моделі поділу теплових потоків, іменованої також моделлю RPI (Rensselaer Polytechnic Institute), дозволяє з високою точністю (до 10 %) прогнозувати коефіцієнт тепловіддачі при кипінні як для чистих речовин, так і для нанофлюїдів.

**Обгрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** підтверджується: коректною постановкою завдань і виконаних досліджень; застосуванням сучасних приладів для вимірювання фізичних величин; проведенням тарувальних експериментів і детальним аналізом невизначеності отриманих експериментальних даних; використанням сучасних математичних методів і програмних засобів; адекватним описом отриманих експериментальних даних.

**Практичне значення отриманих результатів** роботи полягає в тому, що отримані дані про вплив наночастинок на процес кипіння дозволяють виділити ключові фактори, які впливають на інтенсивність теплообміну, і сформулювати рекомендації щодо подальшого впровадження нанотехнологій у промисловість. Запропонована у роботі модель для прогнозування коефіцієнта тепловіддачі при кипінні носить загальний характер, що дозволяє скоротити об'єм дорогих експериментальних досліджень тепловіддачі при кипінні.

**Особистий внесок автора.** Дисертація виконана за консультацій наукового керівника. На окремих етапах у роботі брали участь співробітники лабораторії кафедри теплофізики та прикладної екології ОНАХТ - співавтори публікацій. Особисто здобувачем створено і апробовано експериментальну установку та виконано основний обсяг експериментальних досліджень коефіцієнта тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів R11/XMI Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub> та ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, вивчено вплив наночастинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на відривний діаметр бульбашок ізопропанолу, досліджено часові і температурні залежності стійкості нанофлюїдів, сформульовано рекомендації щодо подальшого розвитку моделі RPI Курула (Kurul) і Подовського (Podowski) для прогнозування коефіцієнта тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів у вільному об'ємі.

**Апробація результатів роботи.** Основні результати виконаних досліджень доповідалися автором на 13 конференціях, в тому числі на: V міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалення малої хладотеплотехніки - використання холоду в харчовій галузі», м. Донецьк, 2010 р.; X Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів та аспірантів «Еколого-енергетичні проблеми початку XXI століття», м. Одеса, 2010 р.; XI Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності», м. Одеса, 2011 р.; 7 міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», м. Одеса, 2011 р.; VIII Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 90-річчю Одеської державної академії холоду «Сталий розвиток і штучний холод», м. Одеса, жовтень 2012 р.; XIII Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності», м. Одеса, 2013 р.; Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки та технології», м. Одеса, квітень 2013 р.; 9 міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», м. Одеса, 2013 р.; II Міжнародній науково-технічній конференції «Холод в енергетиці і на транспорті: Сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації», м. Миколаїв, жовтень 2013 р.; VI Міжнародній науково-технічній конференції «Низькотемпературні і харчові технології в XXI столітті», Росія, Санкт-Петербург, листопад 2013 р.; 6<sup>th</sup> International Conference «Physics of liquid matter: Modern problems», Київ, травень 2014 р.; International symposium on Convective Heat and Mass Transfer, CONV-2014, Turkey, Kusadasi, червень 2014 р.; 11<sup>th</sup> IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, China, Hangzhou, серпень-вересень 2014 р.

За цикл проведених досліджень автор нагороджений дипломом за кращу доповідь «Вплив наночастинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на відривний діаметр бульбашки при кипінні ізопропанолу у вільному об'ємі»

в рамках секції №4 «Теоретичні основи тепло- і холодохімії» VI Міжнародної науково-технічної конференції «Низькотемпературні і харчові технології в XXI столітті», Інститут холоду та біотехнологій, Санкт-Петербурзький національний дослідницький університет інформаційних технологій механіки й оптики.

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладено в 6 статтях, опублікованих у фахових періодичних журналах, 6 друкованих працях, опублікованих у збірниках наукових праць міжнародних конференцій, і 13 роботах, опублікованих у формі тез у збірниках тез доповідей конференцій.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури, 83 джерела і 3 додатків. Робота містить 173 сторінок тексту, включаючи 113 рисунків, 18 таблиць.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, відображено її зв'язок з існуючими державними програмами та держбюджетною науковою тематикою ОНАХТ, сформульовано мету і визначено завдання дослідження. Наведено наукову новизну і практичну цінність виконаних досліджень, вказано особистий внесок здобувача, надано відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи й публікації.

У **першому розділі** наведено короткий огляд експериментальних робіт, присвячених дослідженню процесів кипіння нанофлюїдів у вільному об'ємі. Як показує проведений аналіз, використання нанофлюїдів дає можливість інтенсифікації теплообміну в апаратах холодильного обладнання, і, в цілому, підвищення його енергетичної ефективності, однак наночастинок, присутні в базовій рідині, неоднозначно (при різних параметрах) впливають на тепловіддачу при бульбашковому кипінні. Крім того, на процес кипіння може істотно вплинути зміна структури і шорсткості теплопередавальної поверхні, що відбувається внаслідок осідання на ній наночастинок. Аналізуючи опубліковану інформацію, можна дійти висновку, що кипіння нанофлюїдів відбувається під впливом багатьох факторів, таких як: температура кипіння; теплове навантаження; матеріал наночастинок; розподіл наночастинок за розмірами; ступінь стійкості нанофлюїду; властивості теплопередавальної поверхні; утворення на теплопередавальній поверхні шару осілих наночастинок і зміну внаслідок цього крайового кута змочування та кількості активних центрів пароутворення. Крім того, необхідно враховувати вплив наночастинок і застосовуваних ПАР на фазові рівноваги і теплофізичні властивості базової рідини. Таким чином, коректна кількісна оцінка впливу наночастинок на процес кипіння є комплексною теплофізичною проблемою, яка потребує подальшого дослідження.

Слід зазначити, що відомо дуже мало робіт з дослідження процесів кипіння нанофлюїдів на основі РХМ та спиртів. Вкрай обмеженою є також кількість робіт, присвячених вивченню впливу наночастинок на властивості базової рідини і на відривний діаметр бульбашки при кипінні. Результати багатьох досліджень носять суперечливий характер, що вказує на існування неврахованих авторами факторів.

У **другому розділі** наводиться опис експериментальної апаратури і методик проведення експериментів з дослідження стійкості, теплофізичних властивостей і процесів кипіння нанофлюїдів.

Дослідження стійкості нанофлюїдів проводилося шляхом їх аналізу турбідиметричним методом на установці, схема якої представлена на рис. 1. Джерелом світла є лазер 1 (довжина

хвилі 650 нм). Інтенсивність світлового потоку, що проходить через кювету 2 з досліджуваною рідиною, визначається за допомогою фотодіода 3. Кювета являє собою оптичний осередок - скляне циліндричне кільце, яке ущільнюється по торцях плоскопаралельними скельцями. Оптичний осередок термостатується у масивному циліндричному мідному блоці, через який прокачується теплоносієм з допоміжного термостата.

Для виключення попадання розсіяного світла на фотодіод він поміщений у трубку 4, покриту зсередини матеріалом з високим коефіцієнтом поглинання. З метою отримання паралельного пучка світла діаметром 2 мм встановлені оптичні щілини 5. Живлення лазера і фотодіода здійснюється стабілізованими джерелами живлення 6. Параметром, що характеризує інтенсивність світлового потоку, є падіння напруги на ділянці кола з фотодіодом  $U$ , вимірюване мультиметром 7 марки RIGOL DM3064, для якого границя відхилення значення від його оцінки (ГВЗО) в діапазоні до 200 В не перевищує  $5,4 \cdot 10^{-3} \%$ .

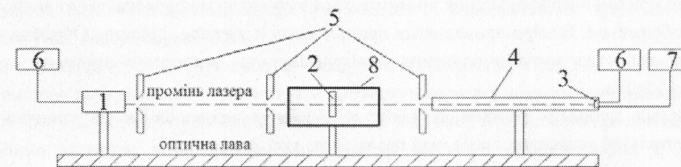


Рис. 1 – Схема експериментальної установки для визначення стійкості та складу нанофлюїдів

Стійкість нанофлюїдів оцінювалася за стабільністю величини  $U_{ratio} = U_{nano}/U_{max}$ , де  $U_{nano}$  і  $U_{max}$  – падіння напруги, виміряні при проходженні світла через кювету, що містить нанофлюїд, і при безперешкодному проходженні світла, відповідно.

Концентрація наночастинок в нанофлюїді визначалася за величиною  $U_{ratio} = U_{nano}/U_{base}$  ( $U_{base}$  – падіння напруги, виміряне при проходженні світла через кювету, що містить чисту базову рідину) з використанням попередньо отриманої калібрувальної залежності. Слід зауважити, що використання для аналізу відносної величини  $U_{ratio}$  дозволяє виключити вплив на результати експерименту можливих змін параметрів джерела світла.

Дослідження впливу наночастинок на тиск насиченої пари базових рідин здійснювалося статичним методом за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів тиску WIKA S-10 (з діапазонами вимірюваних тисків (0...5) та (0...1) бар) з ГВЗО 0,25 % від діапазону.

Дослідження впливу наночастинок на поверхневий натяг базових рідин проводилося диференціальним методом капілярного підняття за допомогою семи капілярів різного діаметра. Різниця висот у капілярах вимірювалися катетометром КМ-8 з ГВЗО не вище 0,02 мм.

Густина розчинів холодоагент/мастило вимірювалася пікнометричним методом. У дослідах використовувалися лабораторні аналітичні ваги марки GR-300 з ГВЗО  $5 \cdot 10^{-7}$  кг і катетометр КМ-8.

При дослідженні тиску насиченої пари, поверхневого натягу та густини вимірювальні осередки розташовувалися у рідинному термостаті, оснащеному системою автоматичного регулювання температури. Коливання температури в термостаті не перевищували 0,02 К. Вимірювання температури здійснювалося платиновим термометром опору марки TR10A з ГВЗО 0,15 і 0,35 К при температурах 0 і 100 °С, відповідно.

Для детального дослідження процесу осідання наночастинок на теплопередавальній поверхні при кипінні нанофлюїду використовувалася спеціальна установка, що представляє собою

теплоізолювану скляну колбу з горизонтально розташованим плоским нагрівачем, виготовленим з листової нержавіючої сталі товщиною 0,1 мм. Після заповнення нанофлюїдом колба герметично з'єднувалася у верхній частині з конденсатором і була вакуумована. У дослідях шляхом відповідного підбору потужності нагрівача і витрати теплоносія, що охолоджує конденсатор, встановлювався певний режим бульбашкового кипіння нанофлюїду при постійній температурі. Після закінчення деякого часу нагрівач витягувався, і його поверхня досліджувалася під оптичним мікроскопом зі збільшенням 40 крат.

Вимірювання крайового кута змочування теплопередавальної поверхні ізопропанолом проводилося таким чином. Досліджувані зразки являли собою пару капілярів, які розташовувалися на відстані 0,2 мм один від одного, занурювалися в бюкс із досліджуваною рідиною і встановлювалися на предметний столик оптичного мікроскопа із вбудованою веб-камерою. Меніск рідини, що утворюється між капілярами, освітлювався світлодіодом, і за допомогою дзеркальної призми його зображення проєктувалося в об'єктив мікроскопа, через який отримували цифрове зображення. Виміри проводилися при натіканні й відтіканні рідини. Обробка зображень і визначення крайових кутів змочування виконувалися за допомогою програми, створеної у середовищі Matlab.

Вивчення процесів кипіння об'єктів дослідження проводилося на створеній автором експериментальній установці, схема якої показана на рис. 2.

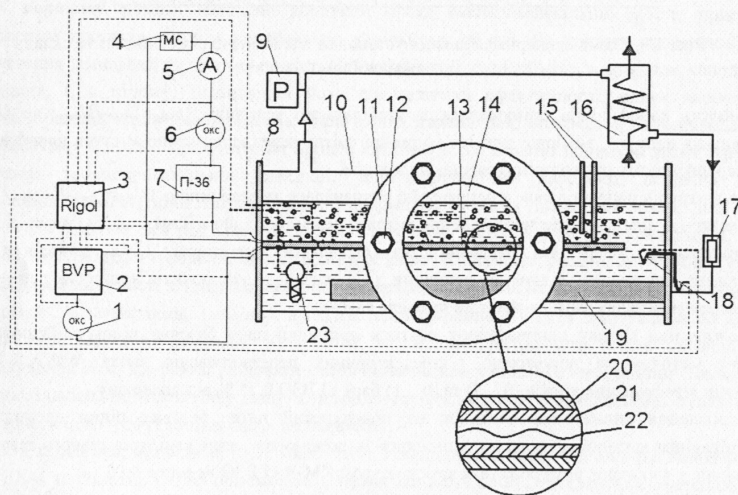


Рис. 2 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження процесів кипіння у вільному об'ємі

Установка реалізує метод вільної циркуляції речовини по замкнутому контуру. Кипіння рідини відбувається в циліндричному (діаметр - 70 мм, об'єм - 1 дм<sup>3</sup>) вимірювальному осередку (бойлері) 10, обладнаному боковими плоскопаралельними кварцовими вікнами 14, через які може здійснюватися кіно- і фотозйомка киплячої рідини. Вікна ущільнено фланцями 11 за допомогою болтів 12. Діаметр оглядового перетину вікон становить 54 мм. Поверхню бойлера

теплоізолювано шаром пінополіуретану з ефективною теплопровідністю 0,02 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При кипінні речовини в бойлері пара через лабиринтовий сепаратор надходить у конденсатор 16, охолоджуваний теплоносієм із допоміжного термостата. Далі конденсат проходить через обігрівальну ділянку 17, де набуває температури, близької до температури киплячої в бойлері рідини. Різниця температур конденсату на вході в бойлер і киплячої рідини контролюється за допомогою диференціальної термопари 18. Конденсат у бойлері рівномірно розподіляється по об'єму рідини через колектор 19.

Робочою ділянкою (поверхнею нагріву) є капіляр з товщиною стінки 0,1 мм, діаметром 2 мм, довжиною 730 мм і опором 0,55 Ом при 20 °С. Матеріал капіляра - нержавіюча сталь. Капіляр зігнутий за М-подібною формою і кріпиться на фторопластовій підставці. Підведення електроенергії від стабілізованого джерела живлення 2 до робочої ділянки здійснюється через два ізолюваних електроводи, впаяні у знімний фланець 8. Електрична потужність, що підводиться до робочої ділянки, визначається компенсаційним методом з використанням зразкової котушки опору 1 марки Р322 класу точності 0,01.

Середня температура робочої ділянки вимірюється (з розширеною невизначеністю (РН) 0,05 К) за опором внутрішнього термометра - протягнутого через капіляр електроізолюваного платинового дроту 22 діаметром 0,1 мм, що має опір 9,5 Ом. Опір платинового дроту визначається компенсаційним методом з використанням зразкової котушки опору 6 марки Р321 класу точності 0,01. Живлення вимірювального ланцюга здійснюється за допомогою стабілізованого джерела живлення 7. Температура киплячої рідини вимірюється мідним термометром опору 19 з РН 0,05 К. Тиск в осередку вимірюється за допомогою п'єзоелектричного перетворювача тиску 9 WIKA S-10. Всі вимірювання здійснюються цифровим мультиметром 3 RIGOL DM3064.

Конструкція установки дозволяє здійснювати відбори невеликих порцій рідини з різних прошарків киплячого розчину для подальшого аналізу їхнього складу. Система відбору складається з капілярів 15 з внутрішнім діаметром 1 мм, з'єднаних через вентиль з приймальними резервуарами (шприцами). Один з цих капілярів встановлено на 10 мм нижче поверхні нагрівання (рівень  $h = -10$ ), другий - на її рівні (рівень  $h = 0$ ), третій - на 10 мм вище (рівень  $h = +10$ ).

Досліди проводилися при постійних температурах кипіння і при різних теплових потоках. Температура киплячої рідини підтримувалася постійною шляхом регулювання витрати і температури холодоносія, що надходить з допоміжного термостата у теплообмінник конденсатора. Залежно від теплового навантаження на робочій ділянці, температури в бойлері і конденсаторі відрізнялися на (7...20) К. Дослід на кожній з ізотерм починався з максимального теплового навантаження на робочій ділянці, яке потім знижувалося з певним кроком. При фіксованому тепловому потоці стаціонарний режим кипіння вважався досягнутим після того, як протягом 20 хвилин спостерігалася незмінність температур рідини, робочої ділянки і тиску насиченої пари.

У третьому розділі подаються результати експериментальних досліджень, виконаних на описаних вище установках.

Технологія отримання зразків наноматил складалася з кількох послідовних процедур. Необхідна кількість наночастинок TiO<sub>2</sub> (CAS 1317-70-0), які мали розміри не більше 25 нм, додавалися у розчин n-гексану з олеїною кислотою (ОК), що використовувалася як стабілізатор-сурфактант. Отримана суспензія піддавалася механічному диспергуванню протягом 24 годин у кульовому млині, заповненому кульками діаметром 2 мм (матеріал кульок - ZrO<sub>2</sub>). Потім цей проміжний зразок нанофлюїду (n-гексан/ОК/наночастинки TiO<sub>2</sub>) у певній пропорції змішувався з

мінеральним компресорним маслом Агрінол ISO 10. Отриману суміш піддавали ультразвуковій гомогенізації протягом 30 хвилин, після чого з неї вакуумуванням видаляли домішки н-гексану. У рамках описаної технології було отримано мінеральне наномасло Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub>, що містило 3,925 мас. % ОК і 2,019 мас. % наночастинок. Після змішання отриманого зразка наномасла з холодоагентом R11 був отриманий розчин нано-РХМ, що містив 3,611 мас. % масла, 0,151 мас. % ОК і 0,0775 мас. % наночастинок TiO<sub>2</sub>. Результати дослідження стійкості приготованих нанофлюїдів, представлені на рис. 3, свідчать, що наномасло Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub> залишається стійким у всьому інтервалі часу проведення досліджень.

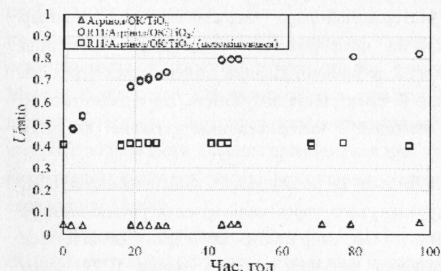


Рис. 3 – Результати дослідження стійкості наномасла Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub> та нано-РХМ R11/Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub>

Зразки нанофлюїдів ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> готувалися шляхом змішування чистого ізопропанолу з фабричним зразком нанофлюїду (CAS 70-21-29), який містив 80 мас. % ізопропілового спирту і 20 мас. % наночастинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з розмірами не більш 50 нм. Таким способом було приготовано п'ять зразків, що містили від 0,036 до 4,212 мас. % наночастинок. Як показало дослідження цих нанофлюїдів, вони залишалися стійкими протягом не менш 100 годин в інтервалі температур від 20 до 70 °С.

Результати дослідження впливу наночастинок TiO<sub>2</sub> на поверхневий натяг і тиск насиченої пари РХМ R11/Агрінол/ОК подано на рис. 4, з якого видно, що домішки наночастинок TiO<sub>2</sub> призводять до значного (до 3,9 %) зростання тиску насиченої пари і сприяють зміні поверхневого натягу РХМ від +1,1 до –4,6 %.

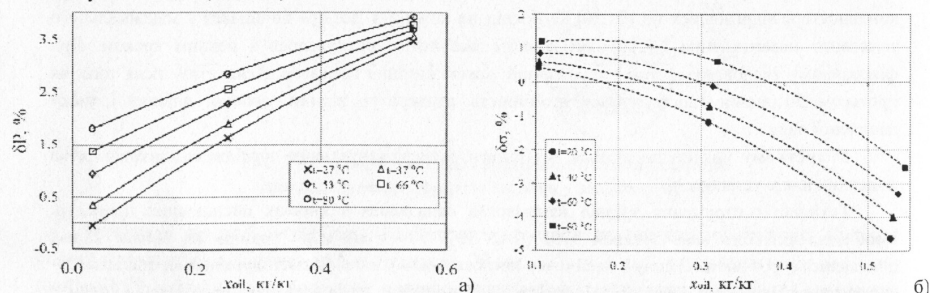


Рис. 4 – Відносні відхилення значень поверхневих властивостей нано-РХМ R11/Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub> від значень поверхневих властивостей РХМ R11/Агрінол/ОК: а) тиск насиченої пари; б) поверхневий натяг

Додавання холодоагенту R11 у нанофлюїд Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub> призводило до порушення його стійкості. На рис. 3 також подано інформацію про стійкість нанофлюїду R11/Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub>, який перед кожним вимірюванням величини  $U_{ratio}$  механічно перемішувався, що можна розглядати як імітацію перемішування киплячого розчину у вимірювальному осередку. У цьому випадку величина  $U_{ratio}$  залишалася незмінною, що дає підстави стверджувати про незмінність концентрації наночастинок у нано-РХМ під час кипіння у подальших дослідках.

Результати дослідження впливу наночастинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на поверхневий натяг і тиск насиченої пари ізопропанолу подано на рис. 5, з якого видно, що наявність наночастинок в ізопропанолі призводить до збільшення тиску насиченої пари та зменшення поверхневого натягу.

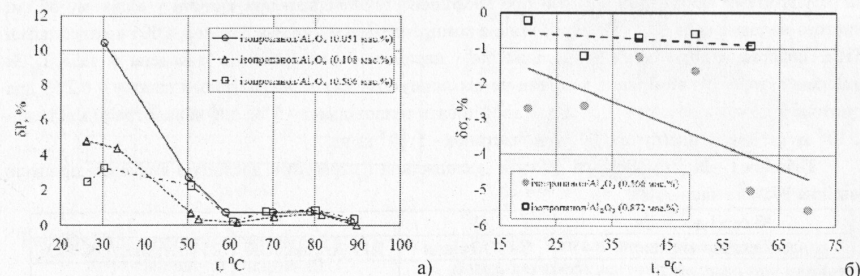


Рис. 5 – Відносні відхилення значень поверхневих властивостей нано-ізопропанолу від значень поверхневих властивостей чистого ізопропанолу: а) тиск насиченої пари; б) поверхневий натяг

За результатами вимірювання густини зазначених вище об'єктів дослідження в інтервалі температур (20...70) °С встановлено, що додавання наночастинок у базову рідину не призводить до зміни даної властивості.

Виконаний аналіз показує, що РН виміряних величин не перевищують: для концентрації масла –  $2 \cdot 10^{-5}$  кг/кг; концентрації ОК і наночастинок –  $5 \cdot 10^{-5}$  кг/кг; тиску насиченої пари – 0,3 %; поверхневого натягу – 4,5 %; густини – 1,2 %.

У результаті проведених досліджень осідання наночастинок на поверхні нагрівача було виявлено, що цей процес локалізується в зоні активних центрів пароутворення, а збільшення концентрації наночастинок у нанофлюїді призводить до більш інтенсивного утворення відкладень.

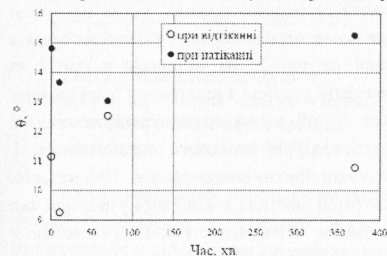


Рис. 6 – Результати дослідження крайового кута змочування нагрівача ізопропіловим спиртом в залежності від часу кипіння нанофлюїду ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Досліди з вимірювання крайового кута змочування матеріалу нагрівача ізопропіловим спиртом проводилися з використанням капілярів, ідентичних тим, з яких виготовляються робочі ділянки, що використовувалися при вивченні процесів кипіння. Процес кипіння нанофлюїду ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, що містив 0,0429 мас. % наночастинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, відбувався на поверхні зразків капілярів-нагрівачів протягом 10, 60 і 360 хв. Після кожного з цих періодів проводилися вимірювання крайового кута змочування. Кипіння нанофлюїду відбувалося за розвинутого бульбашкового режиму при середній температурі 68 °С і густині теплового потоку 32 кВт/м<sup>2</sup>. Результати дослідження представлені на рис. 6, з якого видно, що крайовий кут змочування практично не залежить від часу кипіння нанофлюїду - спостерігаються лише відхилення виміряних величин від середнього значення, сумірні з відповідною стандартною невизначеністю за типом А, яка не перевищує 2<sup>о</sup>. Таким чином, можна зробити висновок, що в даному випадку (коли матеріал нагрівача є гідрофільним по відношенню до базової рідини нанофлюїду) вплив осадження наночастинок на

крайовий кут змочування теплопередавальної поверхні не слід розглядати як фактор, що визначає інтенсивність кипіння.

У рамках дослідження процесів кипіння РХМ і нано-РХМ було проведено три серії дослідів, за результатами яких отримано дані про коефіцієнт тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі чистого холодоагенту R11 і його розчинів з компресорним мастилом Агрінол, ОК і наночастками  $\text{TiO}_2$ . Інформація про об'єкти дослідження і параметри експериментів наведена в табл. 1. За оцінкою автора, РН вимірних величин не перевищують: для температурного напору – 0,2 К; для густини теплового потоку – 1,5 %; для коефіцієнта тепловіддачі – 5 %; для концентрації мастила –  $2 \cdot 10^{-5}$  кг/кг; для концентрації ОК і наночастинок –  $5 \cdot 10^{-5}$  кг/кг.

Таблиця 1 – Інформація про об'єкти дослідження і параметри дослідів з вивчення процесів кипіння РХМ та нано-РХМ

№ серії дослідів	1	2	3
Об'єкт дослідження	R11/Агрінол	R11/Агрінол/ОК	R11/Агрінол/ОК/ $\text{TiO}_2$
Брутто-концентрації компонентів у зразках, мас. %	$x_{oil} = 0$ ; $x_{oil} = 3,485$ ; $x_{oil} = 7,456$ ; $x_{oil} = 14,000$	$x_{oil} = 3,863$ ; $x_{OK} = 0,196$	$x_{oil} = 3,611$ ; $x_{OK} = 0,151$ ; $x_{\text{TiO}_2} = 0,0775$
Експериментальні ізотерми, °С	40; 50; 60	40	40
Інтервал густини теплового потоку, кВт/м <sup>2</sup>	5...63	5...63	5...63

Одним із важливих шумових ефектів, що визначають методичну похибку при експериментальному дослідженні процесів кипіння РХМ, є зміна складу розчину в зоні кипіння у порівнянні з його брутто-складом (тобто середнім складом всього розчину, що знаходиться у вимірювальному осередку) і формування градієнта складу по висоті вимірювального осередка. Слід підкреслити, що, на відміну від переважної більшості опублікованих робіт, присвячених вивченню процесів кипіння РХМ, в даній роботі при інтерпретації результатів експерименту вплив цього ефекту було враховано шляхом відповідного корегування експериментальних даних на основі інформації про склад киплячого шару розчину, отриманої при аналізі відібраних у досліді зразків розчину. Деякі отримані при цьому дані представлені на рис. 7. Як випливає з рис. 7 та експериментальних даних при інших параметрах, концентрації мастила в киплячому шарі і в зоні, віддаленій на 10 мм нижче нього, практично збігаються. У той же час концентрація мастила в киплячому розчині істотно змінюється залежно від температури, теплового навантаження, і, відповідно, від режиму кипіння, та може значно перевищувати брутто-концентрацію. При низьких густинах теплового потоку відносні відхилення концентрацій мастила в киплячому розчині від брутто-концентрації становили (20...80) %. З підвищенням інтенсивності кипіння значення концентрації мастила в киплячому шарі РХМ наближалися до брутто-концентрації, що, певно, є наслідком інтенсивного перемішування РХМ в умовах розвинутого режиму кипіння.

Зважаючи на викладені обставини, вбачається некоректним відносити вимірювані характеристики процесу кипіння до брутто-складу РХМ. У зв'язку з цим узагальнення експериментальної інформації проводилося шляхом побудови поверхонь у координатах  $\alpha - q - x_{oil}$ , які описують дані, отримані при постійних температурах кипіння і відносяться до визначених експериментально складів розчину. Одну з таких апроксимаційних поверхонь зображено на рис. 8.

З використанням отриманих кореляцій  $\alpha(q, x_{oil})$  були побудовані залежності коефіцієнта тепловіддачі від густини теплового потоку для розчинів постійного складу, представлені на рис. 9, де також наведено експериментальні значення коефіцієнта тепловіддачі, віднесені до брутто-

складу досліджених у досліді розчинів.

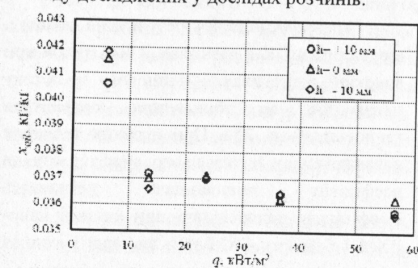


Рис. 7 – Склад киплячого розчину R11/Агрінол при температурі кипіння 40 °С і брутто-концентрації  $x_{oil} = 0,0342$  кг/кг

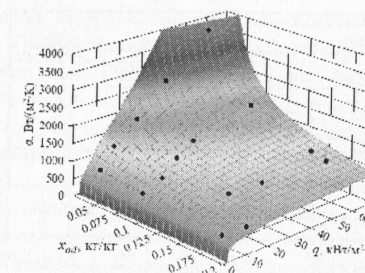


Рис. 8 – Узагальнення експериментальних даних про коефіцієнт тепловіддачі при кипінні розчинів R11/Агрінол (температура кипіння 40 °С)

На рис. 10 представлені відносні відхилення експериментальних значень коефіцієнта тепловіддачі, віднесені до брутто-концентрації мастила, від величин, розрахованих у відповідних перетинах поверхні  $\alpha - q - x_{oil}$ .

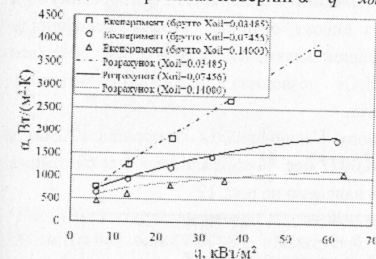


Рис. 9 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від густини теплового потоку при кипінні розчинів R11/мастило (температура кипіння 40 °С)

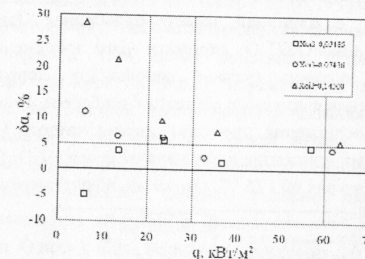


Рис. 10 – Відносні відхилення експериментальних значень коефіцієнта тепловіддачі, віднесені до брутто-концентрації мастила, від величин, розрахованих за узагальноною залежністю  $\alpha(q, x_{oil})$  (температура кипіння 40 °С)

Аналіз інформації, наведеної на рис. 9 та 10, свідчить про значне систематичне відхилення значень коефіцієнта тепловіддачі, віднесені до брутто-концентрації мастила, від величин, розрахованих у відповідних перетинах поверхні  $\alpha - q - x_{oil}$ . Так, у зоні низьких густин теплового потоку при концентрації  $x_{oil} = 7,456$  мас. % максимальне відхилення становить 11,3 %, а при концентрації  $x_{oil} = 14,000$  мас. % – 28,5 %. З підвищенням густини теплового потоку ці відхилення зменшуються до (4...5,5) %. Таким чином, величина і систематичний характер цих відхилень підтверджують обґрунтованість і доцільність застосованих в даній роботі методики експерименту, а також способу інтерпретації та обробки даних.

У відповідності до описаної вище методики експерименту та обробки даних було проведено ще дві серії дослідів з метою вивчення впливу на процес кипіння базового РХМ домішок сурфактанту, що застосовувався для стабілізації нано-РХМ, а також домішок наночастинок  $\text{TiO}_2$ . Результати порівняння значень коефіцієнта тепловіддачі при кипінні РХМ з домішками ОК і наночастинок  $\text{TiO}_2$  зі значеннями коефіцієнта тепловіддачі при кипінні базового РХМ R11/Агрінол

наведено на рис. 11.

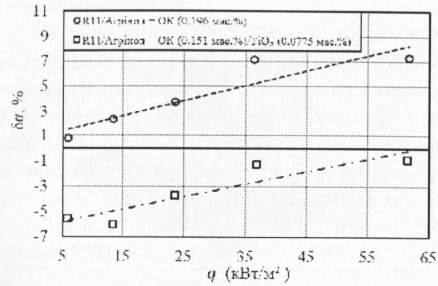


Рис. 11 – Відносні відхилення значень коефіцієнта тепловіддачі при кипінні РХМ з домішками ОК і наночастинок TiO<sub>2</sub> від значень коефіцієнта тепловіддачі при кипінні РХМ R11/Агрінол

наночастинок TiO<sub>2</sub> в цілому негативно впливають на інтенсивність теплообміну при кипінні РХМ.

Одним із важливих чинників, які багато в чому визначають інтенсивність теплообміну при кипінні, є відривний діаметр бульбашки. Однак через високу оптичну густину нанофлюїду R11/Агрінол/ОК/TiO<sub>2</sub> отримати чіткі зображення бульбашок виявилось неможливим. Набагато менша оптична густина нанофлюїду ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> дозволила застосувати методику визначення відривного діаметра бульбашки, описану нижче.

Дослідження процесів кипіння чистого ізопропанолу і нанофлюїдів ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з масовими концентраціями наночастинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,0495 і 0,0977 мас. % проводилося при постійних температурах 60 і 75 °С. Отримані експериментальні дані наведено на рис. 12.

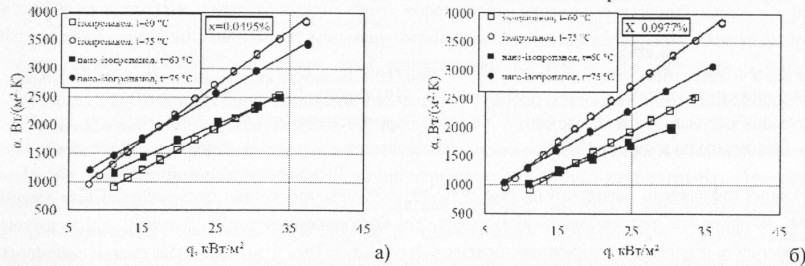


Рис. 12 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  при кипінні ізопропанолу і нано-ізопропанолу від густини теплового потоку  $q$  при різних концентраціях наночастинок  $x$ : а)  $x = 0,0495$  мас. %, б)  $x = 0,0977$  мас. %

Аналіз цих даних показує, що наявність наночастинок в ізопропанолі може призвести до підвищення коефіцієнта тепловіддачі при кипінні на (10...26) %. Однак цей ефект спостерігається тільки при невисоких густинах теплового потоку і зменшується з підвищенням температури і концентрації наночастинок. При високій густині теплового потоку присутність наночастинок у базовій рідині призводить до зниження інтенсивності теплообміну.

Аналіз отриманих результатів показує, що домішки ОК в розчинах R11/Агрінол при високих густинах теплового потоку призводять до збільшення коефіцієнта тепловіддачі на 7 %. При низьких теплових навантаженнях вплив цього сурфактанту на коефіцієнт тепловіддачі незначний. Коефіцієнти тепловіддачі при кипінні нано-РХМ і базового РХМ при високих густинах теплового потоку практично збігаються, однак зі збільшенням теплового навантаження спостерігається зменшення коефіцієнта тепловіддачі в киплячому нано-РХМ на (5...6) % у порівнянні з базовим РХМ. Таким чином, слід констатувати, що домішки

Дані про відривний діаметр бульбашки були отримані при обробці фотографічних зображень киплячої рідини. Обробка фотографій проводилася за допомогою програмного забезпечення AutoCAD. Для цього отримані знімки додавалися в робочу зону програми як растрове зображення, на межу фотозображення бульбашки накладався еліпс, і обчислювалася площа фігури  $F_e$ , обмежена цим еліпсом. Діаметр зображення бульбашки  $d_0$  приймався рівним діаметру кола з площею  $F_e$ . Масштаб  $M$  визначався як відношення відомого діаметра робочої ділянки до його діаметра, виміряного на фотографії. Дійсний діаметр бульбашки  $D_0$  розраховувався як добуток  $D_0 = M \cdot d_0$ .

Як приклад на рис. 13 наведено результати обробки фотозображень бульбашок пари для одного з режимів кипіння ізопропанолу. Отримані дані піддавалися статистичній обробці з метою визначення найімовірнішого відривного діаметра бульбашки, характерного для кожного з режимів кипіння. При цьому найімовірніше значення діаметра  $D_0$  приймалося рівним медіані розподілу. Результати цієї обробки наведено на рис. 14, де представлено значення медіан розподілів діаметрів бульбашок.

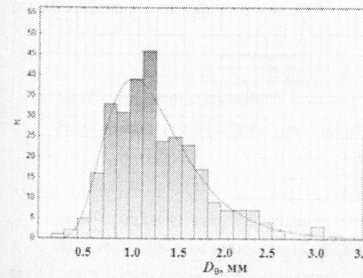


Рис. 13 – Розподіл величини відривного діаметра бульбашок  $D_0$  за їх кількістю  $N$  при температурі кипіння ізопропанолу  $t = 60$  °С і густині теплового потоку  $16,4$  кВт/м<sup>2</sup>

З поданих на рис. 14 результатів видно, що відривні діаметри бульбашок у нанофлюїдах і в базовій рідині можуть істотно відрізнятися. Їхні величини визначаються як температурою та густиною теплового потоку, так і концентрацією наночастинок у нанофлюїді. При цьому залежність відривного діаметра від того чи іншого параметра не завжди однозначна. Зокрема, при температурі кипіння 60 °С величина  $D_0$  у нанофлюїдах завжди менша, ніж у чистому ізопропанолі. При температурі кипіння 75 °С і низьких теплових потоках відривні діаметри бульбашок для нанофлюїду менші, ніж для базової рідини. Однак у міру збільшення теплового потоку в нанофлюїді відривні діаметри зростають і стають більшими, ніж у чистому ізопропанолі.

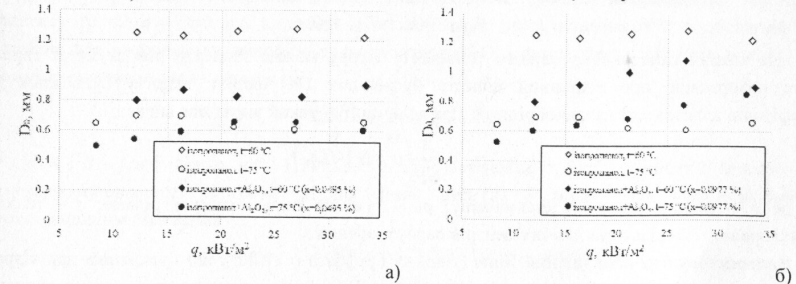


Рис. 14 – Відривний діаметр бульбашок при кипінні ізопропанолу і нанофлюїдів ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: а)  $x = 0,0495$  мас. %, б)  $x = 0,0977$  мас. %

Четвертий розділ присвячений моделюванню та аналізу процесу переносу теплоти при бульбашковому кипінні у вільному об'ємі холодоагенту R11, ізопропанолу і нанофлюїду

ізопропанол/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

У дисертації наводиться короткий огляд моделей, запропонованих для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів у вільному об'ємі. Необхідно відзначити, що в основному ці моделі носять емпіричний характер і можуть бути використані тільки для досліджених авторами нанофлюїдів та умов проведення експерименту. Виправданість поширення таких кореляцій на інші рідини і умови експерименту вимагає експериментального підтвердження.

У дисертації як базову було прийнято модель RPI, запропоновану Курулом (Kurul) та Подовським (Podowski). Ця модель, заснована на схемі Bowring роздільного врахування різних механізмів переносу теплоти при кипінні, була адаптована для бульбашкового кипіння у вільному об'ємі.

У рамках даної моделі розглядаються такі механізми переносу теплоти: передача теплоти за рахунок випаровування - теплота, що витрачається на утворення бульбашок -  $q_v$ ; витрата теплоти на відновлення теплового прилежого шару після відриву бульбашки -  $q_{mш}$ ; передача теплоти рідині конвекцією за межами зони впливу бульбашок -  $q_k$ . Схему росту бульбашки і механізми передачі теплоти при кипінні зображено на рис. 15.

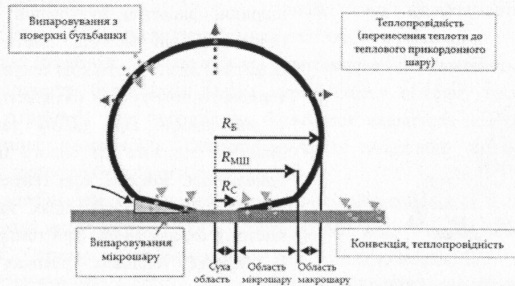


Рис 15 – Схема росту бульбашки і механізмів передачі теплоти:  $R_b$  – радіус бульбашки;  $R_{mш}$  – радіус мікрошару;  $R_c$  – радіус сухої зони

Таким чином, сумарний переданий тепловий потік  $q_{сум}$  визначають за формулою

$$q_{сум} = q_v + q_{mш} + q_k \quad (1)$$

Для кожної складової сумарного теплового потоку можна записати розрахункові вирази, маючи інформацію про відривний діаметр бульбашок  $D_0$ , частоту відриву бульбашок  $f$  і теплофізичні властивості киплячої рідини. Для величини  $q_v$  такий вираз має вигляд:

$$q_v = \frac{\pi}{6F} \rho_n r N (f D_0^3), \quad (2)$$

де  $F$  – площа поверхні теплообміну;  $\rho_n$  – густина пари киплячої рідини;  $r$  – теплота пароутворення;  $N$  – кількість діючих центрів пароутворення.

Використовуючи припущення Хана (Han) та Гріффіта (Griffith), що бульбашка при відриві збурує зону теплового прилежого шару товщиною  $2D_0$ , вираз для величини  $q_{mш}$  можна записати таким чином:

$$q_{mш} = \frac{2\pi\lambda(T_{ст} - T_n)}{F\sqrt{\pi a}} N \left( f D_0^2 \sqrt{1/f} \right). \quad (3)$$

Слід зазначити, що у розрахунках використовувалися значення  $D_0$ , знайдені за описаною

вище методикою, а частота відриву бульбашок  $f$  розраховувалася за формулою Толубинського

$$f = \frac{2\theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho - \rho_n)}}}{D_0}, \quad (4)$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $\theta$  – крайовий кут змочування, приймається рівним  $30^\circ$  незалежно від рідини.

Теплота, передана вільною конвекцією від зони нагрівача, що не збурена бульбашками, приймалася рівною

$$q_k = \left[ 1 - \left( \frac{\pi}{4F} N D_0^2 + F_3 \right) \right] \alpha_k (T_{ст} - T_n), \quad (5)$$

де  $T_{ст}$ ,  $T_n$  – температури стінки і насичення відповідно;  $F_3$  – частка площі нагрівача, що обурюється бульбашками, які зісковзують з нижньої частини нагрівача. Ця частка площі розраховувалася за такою формулою

$$F_3 = \frac{\pi D_0 d N}{8F}, \quad (6)$$

де  $d$  – діаметр нагрівача.

Коефіцієнт тепловіддачі при вільній конвекції розраховувався за формулою

$$\alpha_k = \frac{\lambda}{d} \left[ 0,52 \text{Pr}^{0,3} - 0,02 \text{Pr}^{-0,33} \right] \text{Gr}^{0,25}, \quad (7)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність рідини;  $\text{Pr}$  – число Прандтля;  $\text{Gr}$  – число Грасгофа.

Кількість діючих центрів пароутворення  $N$  було визначено з умови  $q \approx q_{сум}$ , де  $q$  – теплота, що виділялася нагрівачем в експерименті.

Результати розрахунку кількості діючих центрів пароутворення для чистого ізопропанолу і нанофлюїдів ізопропанол/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  показують, що величина  $N$  дуже сильно (в кілька разів) змінюється залежно від температури кипіння, густини теплового потоку і концентрації наночастинок. Однак будь-якої концентраційної залежності при цьому не спостерігається.

Аналіз отриманих експериментальних даних дозволяє зробити висновок, що залежність комплексу  $\Delta t \cdot D_0 / q \equiv D_0 / \alpha$  від кількості діючих центрів пароутворення  $N$  є в достатній мірі загальною для ізопропанолу, нанофлюїду ізопропанол/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  і холодоагенту R11 (див. рис. 16). Цю залежність апроксимовано рівнянням

$$\frac{\Delta t \cdot D_0}{q} = \frac{D_0}{\alpha} = A + \frac{B}{N^{0,5}}, \quad (8)$$

де  $A$  і  $B$  – коефіцієнти,  $A = -1,33922 \cdot 10^{-7}$ . Було встановлено, що коефіцієнт  $B$  залежить від температуропровідності киплячої рідини (див. рис. 17) і може бути розрахований за апроксимаційним рівнянням

$$B = -2,113 \cdot 10^{11} a^2 + 3,076 \cdot 10^4 a - 9,044 \cdot 10^{-4}. \quad (9)$$

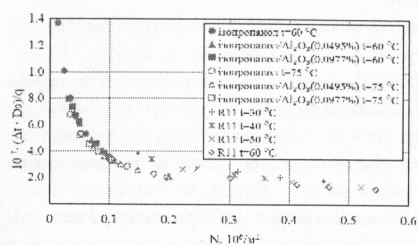


Рис. 16 – Залежність комплексу  $\Delta t \cdot D_0/q$  від кількості діючих центрів пароутворення  $N$

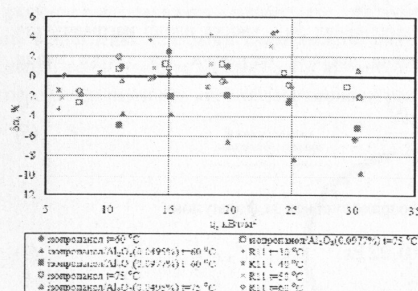


Рис. 18 – Відносні відхилення емпіричних даних про коефіцієнт тепловіддачі при кипінні досліджених рідин від значень, розрахованих за рівняннями (8) і (9)

## ВИСНОВКИ

У дисертації вперше отримано експериментальні дані про коефіцієнт тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів R11/Агрінол/ОК/ТiO<sub>2</sub> і ізопропанол/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та вивчено вплив наночастинок на поверхневі властивості цих об'єктів дослідження. У роботі отримала подальший розвиток запропонована Курулом (Kurul) та Подовським (Podowski) модель для розрахунку кількості переданої теплоти при кипінні у вільному об'ємі. За результатами проведеного дослідження можна сформулювати такі висновки.

1. Основною проблемою отримання відтворюваних результатів при вивченні теплофізичних властивостей нанофлюїдів та процесів кипіння у них є контроль стійкості об'єктів дослідження. Застосована технологія приготування наномастила забезпечує його стійкість протягом не менш 100 годин. Стійкість нано-РХМ зберігається лише в умовах перемішування (зокрема, при кипінні).

2. Домішки наночастинок у базових рідинах - ізопропанолі та розчині R11/Агрінол - сприяють збільшенню тиску насиченої пари та зменшенню поверхневого натягу.

3. В умовах експерименту з дослідження процесів кипіння РХМ у вільному об'ємі склад киплячого шару істотно змінюється залежно від температури, теплового навантаження і, відповідно, від режиму кипіння, і може значно відрізнятися від бруто-складу розчину. Величина і систематичний характер цих відхилень підтверджують обґрунтованість і доцільність застосованих

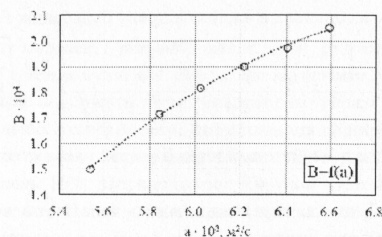


Рис. 17– Залежність коефіцієнта  $B$  рівняння (9) від теплопровідності киплячої рідини

Відхилення емпіричних даних про коефіцієнт тепловіддачі при кипінні досліджених рідин від значень, розрахованих за рівняннями (8) і (9) з використанням експериментальної інформації про відривний діаметр бульбашки  $D_0$  і розрахункової інформації про кількість центрів пароутворення  $N$ , в основному лежать в полі  $\pm 5\%$  і не перевищують 10% (див. рис. 18), що свідчить про прийнятну точність пропонувані кореляції.

в даній роботі методики експерименту та способу інтерпретації і обробки даних про коефіцієнт тепловіддачі при кипінні РХМ.

4. Залежно від параметрів процесу кипіння, наявність наночастинок у базовій рідині може призводити як до збільшення, так і до зменшення коефіцієнта тепловіддачі. Домішки наночастинок TiO<sub>2</sub> в цілому чинять негативний вплив на інтенсивність теплообміну при кипінні РХМ. Наявність наночастинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в ізопропанолі при низьких густинах теплового потоку сприяє інтенсифікації теплообміну, однак цей ефект зменшується з підвищенням температури і концентрації наночастинок. При високій густині теплового потоку (як правило, вище 15 кВт/м<sup>2</sup>) коефіцієнт тепловіддачі при кипінні нано-ізопропанолу стає меншим у порівнянні з чистим ізопропанолом.

5. Осадження наночастинок на поверхні нагрівача сильно впливає на кількість активних центрів пароутворення, а відтак, і на інтенсивність процесу кипіння. Зміна морфології наноструктурованої теплопередавальної поверхні призводить до зміни умов росту і відриву бульбашок, про що свідчать отримані в роботі дані про вплив наночастинок на відривний діаметр бульбашок. При цьому якщо матеріал нагрівача є гідрофільним по відношенню до базового компонента нанофлюїду, вплив осадження наночастинок на крайовий кут змочування теплопередавальної поверхні не слід розглядати як фактор, що визначає інтенсивність кипіння.

6. Відривні діаметри бульбашок у нанофлюїдах і в базовій рідині можуть істотно відрізнятися. Їхня величина визначається як температурою та густиною теплового потоку, так і концентрацією наночастинок. При цьому залежність відривного діаметру від того чи іншого параметра не завжди однозначна. Зокрема, при температурі кипіння 60 °C відривний діаметр у нано-ізопропанолі завжди менший, ніж у чистому ізопропанолі. При температурі кипіння 75 °C при низьких теплових потоках відривні діаметри бульбашок для нанофлюїду менші, ніж для базової рідини. Однак у міру збільшення теплового потоку відривні діаметри бульбашок у нанофлюїді зростають і стають більшими, ніж у чистому ізопропанолі.

7. Проведене дослідження показує, що коректне моделювання процесів кипіння нанофлюїдів у вільному об'ємі має враховувати зміну морфології поверхні нагрівання, що впливає на кількість центрів пароутворення і розмір відривних діаметрів бульбашок. З урахуванням викладених факторів найбільш прийнятною для прогнозування коефіцієнта тепловіддачі вбачається базова модель поділу теплових потоків.

8. Вперше показано, що залежність комплексу  $\Delta t \cdot D_0/q$  від густини центрів пароутворення носить універсальний характер для різних класів речовин. Застосування запропонованої кореляції дозволяє значно скоротити об'єм дорогих експериментальних досліджень коефіцієнта тепловіддачі при кипінні чистих речовин і нанофлюїдів у вільному об'ємі.

9. Складні явища, що виникають при експериментальному дослідженні процесів кипіння нанофлюїдів у вільному об'ємі вимагають додаткових досліджень та знаходження нових кореляцій для коректного визначення відривного діаметра бульбашок, зміни кількості центрів пароутворення, а також врахування впливу наночастинок на теплофізичні властивості базової рідини.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Крыжановский С.С. Установка для исследования теплофизических свойств и процессов при кипении в свободном объеме растворов хладагент/масло и нанофлюидов [Текст] / С.С. Крыжановский, И.В. Олейник, А.Г. Никулин, В.П. Желзний // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. Зб. Наук. Пр./Голов. ред. О.О. Шубін; Донец. нац. ун-т економіки та торгівлі

ім. М. Туган-Барановського, Вип.24, 2010. - С. 89-98. *Особистий внесок: участь у створенні експериментальної установки, розробці методики досліджень, в експерименті та обробці експериментальних даних.*

2. Нікулін А.Г. Експериментальне дослідження тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі холодоагентів та їхніх розчинів з компресорними мастилами [Текст] / А.Г. Нікулін, І.В. Олійнік, А.В. Мельник // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. Зб. Наук. Пр./Голов. ред. О.О. Шубін; Донец. нац. ун-т економіки та торгівлі ім. М. Туган-Барановського, Вип.29 Т.1, 2012.- С. 142-148. *Особистий внесок: проектування і створення експериментальної установки, розробка методики досліджень, проведення експериментів, обробка та аналіз експериментальних даних.*

3. Никулин А.Г. Экспериментальная установка для исследования процессов кипения чистых жидкостей и растворов в свободном объеме [Текст] / А.Г. Никулин, Ю.В. Семенов, Н.Н. Лукьянов // Холодильная техника і технологія, №4 (144), 2013.- С. 12-18. *Особистий внесок: проектування і створення експериментальної установки, розробка методики досліджень, проведення експериментів, обробка та аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації.*

4. Никулин А.Г. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении раствора хладагент/масло в свободном объеме [Текст] / А.Г. Никулин, Ю.В. Семенов, Н.Н. Лукьянов // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2013. - № 5-6 (450). – С. 67-71. *Особистий внесок: проведення експериментів, обробка та аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації.*

5. Железный В.П. Методические особенности экспериментального изучения процессов кипения нанофлюидов в свободном объеме [Текст] / В.П. Железный, Ю.В. Семенов, А.Г. Никулин, Н.Н. Лукьянов // Вестник МАХ, №3, 2014.- С.4-9. *Особистий внесок: проведення експериментів, обробка та аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації.*

6. Методические особенности изучения процессов кипения в свободном объеме нанофлюида изопропанол/ $Al_2O_3$  [Текст] / В.П. Железный, Ю.В. Семенов, В.Я. Гоцульский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, №2/5 (68), 2014. - С. 39-45. *Особистий внесок: проведення експериментів, обробка та аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації.*

#### АНОТАЦІЯ

Нікулін А.Г. Експериментальне дослідження особливостей кипіння нанофлюїдів у вільному об'ємі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2015 р.

Дисертація присвячена експериментальним дослідженням особливостей кипіння нано-РХМ (розчинів холодоагенту R11 з мінеральним компресорним мастилом Агринол, що містять наночастинок  $TiO_2$ ) і нано-ізопропанолу (суспензій наночастинок  $Al_2O_3$  в ізопропіловому спирті).

У роботі вивчено такі питання: стійкість нанофлюїдів; вплив наночастинок на тиск насиченої пари, поверхневий натяг і густину базових рідин; осадження наночастинок на теплопередавальній поверхні у процесі кипіння і вплив утвореного шару наночастинок на крайовий кут змочування; вплив наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі (КТВ) при кипінні РХМ, на КТВ і відривний діаметр бульбашки при кипінні ізопропанолу.

Встановлено, що додавання наночастинок у РХМ та ізопропанол призводить до збільшення тиску насиченої пари, зменшення поверхневого натягу і не впливає на густину. Домішки

наночастинок  $TiO_2$  в цілому чинять негативний вплив на інтенсивність теплообміну при кипінні РХМ. Наявність наночастинок  $Al_2O_3$  в ізопропанолі при низьких густинах теплового потоку сприяє інтенсифікації теплообміну, однак цей ефект зменшується з підвищенням температури і концентрації наночастинок. При високій густині теплового потоку (як правило, вище  $15 \text{ кВт/м}^2$ ) КТВ при кипінні нано-ізопропанолу стає меншим у порівнянні з чистим ізопропанолом.

У дисертації розроблено узагальнену залежність, яка дозволяє прогнозувати КТВ при кипінні чистих речовин та нанофлюїдів у вільному об'ємі з відхиленнями не вище 10 % і може бути рекомендована для розрахунку теплообмінних апаратів холодильних установок, теплових насосів і теплових труб.

**Ключові слова:** кипіння, нанофлюїд, наночастинок, розчини холодоагент/мастило, стійкість, теплофізичні властивості, крайовий кут змочування, коефіцієнт тепловіддачі, відривний діаметр бульбашки.

#### АННОТАЦИЯ

Никулин А.Г. Экспериментальное исследование особенностей кипения нанофлюидов в свободном объеме. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2015 г.

Диссертация посвящена экспериментальным исследованиям особенностей кипения нано-РХМ (растворов хладагента R11 с минеральным компрессорным маслом Агринол, содержащих наночастицы  $TiO_2$ ) и нано-изопропанолу (суспензий наночастиц  $Al_2O_3$  в изопропиловом спирте).

В работе изучены следующие вопросы: устойчивость нанофлюидов; влияние наночастиц на давление насыщенных паров, поверхностное натяжение и плотность базовых жидкостей; осаждение наночастиц на теплопередающей поверхности в процессе кипения и влияние образовавшегося слоя наночастиц на крайовой угол смачивания; влияние наночастиц на коэффициент теплоотдачи (КТО) при кипении РХМ, КТО и отрывной диаметр пузырька при кипении изопропанолу.

Проведенные эксперименты показали, что приготовленное нано-масло Агринол/олеиновая кислота/ $TiO_2$  и нанофлюиды изопропанол/ $Al_2O_3$  остаются устойчивыми не менее 100 часов, а добавление R11 в нано-масло приводит к нарушению устойчивости.

Установлено, что добавление наночастиц в РХМ и изопропанол приводит к увеличению давления насыщенных паров, уменьшению поверхностного натяжения и не влияет на плотность. Осаждение наночастиц  $Al_2O_3$  при кипении нано-изопропанолу локализовано в центрах парообразования, а образовавшийся слой наночастиц не влияет на крайовой угол смачивания. Примеси наночастиц  $TiO_2$  в целом оказывают негативное влияние на интенсивность теплообмена при кипении РХМ. Наличие наночастиц  $Al_2O_3$  в изопропанолу при низких плотностях теплового потока способствует интенсификации теплообмена, однако этот эффект уменьшается с повышением температуры и концентрации наночастиц. При высоких плотностях теплового потока (как правило, выше  $15 \text{ кВт/м}^2$ ) КТО при кипении нано-изопропанолу становится меньшим по сравнению с чистым изопропанолом. Также было обнаружено существенное, не всегда однозначное, влияние наночастиц на отрывной диаметр пузырьков в кипящем нано-изопропанолу.

В диссертации в качестве базовой принята модель RPI, основанная на схеме раздельного учета различных механизмов переноса теплоты при кипении. В рамках данного подхода разработана обобщенная зависимость, которая позволяет прогнозировать КТО при кипении

чистых веществ и нанофлюидов в свободном объеме с отклонениями не выше 10 % и может быть рекомендована для расчета теплообменных аппаратов холодильных установок, тепловых насосов и тепловых труб.

**Ключевые слова:** кипение, нанофлюид, наночастицы, растворы хладагент/масло, устойчивость, теплофизические свойства, краевой угол смачивания, коэффициент теплоотдачи, отрывной диаметр пузырька.

#### ABSTRACT

Nikulin A.G. **Experimental investigation on pool boiling features of nanofluids.** – Manuscript.

Thesis for Candidate of science (Engineering) degree by specialty 05.14.06 – «Technical Thermophysics and Thermal Engineering». – Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2015.

This thesis is dedicated to experimental investigation on pool boiling features of nano-ROS (refrigerant R11 solutions with mineral compressor oil Agrinol comprising nanoparticles  $\text{TiO}_2$ ) and nano-isopropanol ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles suspensions in isopropyl alcohol).

In this thesis the following issues were investigated: nanofluids stability, nanoparticles impact on the vapor pressure, surface tension and density of base fluids; nanoparticles deposition on heat transfer surface during boiling process and nanoparticles layer influence on the contact angle; nanoparticles influence on heat transfer coefficient (HTC) during ROS boiling, HTC and bubble departure diameter during isopropanol boiling.

It has been established that nanoparticles additives in ROS and isopropanol increases the vapor pressure, reduce the surface tension and does not affect the density. Additives of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles in general have a negative effect on the heat transfer intensity during ROS boiling. Additives of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles to isopropanol enhance heat transfer at low heat flux densities, however, this effect decreases with increasing temperature and concentration of nanoparticles. At higher heat flux densities (typically greater than  $15 \text{ kW/m}^2$ ) nano-isopropanol HTC becomes lower as compared with pure isopropanol.

In this thesis the generalized dependence was developed, which allows to predict the HTC during pure substances and nanofluids pool boiling with deviations not greater than 10 % and can be recommended for the calculation of heat exchangers in refrigeration units, heat pumps and heat pipes.

**Keywords:** boiling, nanofluid, nanoparticles, refrigerant/oil solutions, stability, thermophysical properties, contact angle, heat transfer coefficient, departure diameter of bubble.

---

Папір офсетний А60×90/16. Заказ № 618. Тираж 100 шт.  
копіювальний центр "Грецький будинок" ЧП "Майн-Рейн Круїз"  
м. Одеса, пров. Віце-Адмірала Жукова, 3/7  
тел./факс: (0482) 375-235