

УДК 536.06

## ON THE PROBLEM OF HEAT TRANSFER DURING ALUMINOSILICATE NANOFLUID BOILING

V. Moraru, A. Snigur

*Gas Institute of NAS of Ukraine*

A. Kopylenko

*National University of Food Technologies*

O. Timonin, S. Sydorenko

*National Technical University of Ukraine "KPI"*

---

**Key words:**

*Nanofluid*

*Boiling*

*Specific heat flux*

*Boiling crisis*

*Heat exchange coefficient*

---

**Article history:**

Received 30.09.2014

Received in revised form  
12.10.2014

Accepted 25.10.2014

---

**Corresponding author:**

A. Kopylenko

**Email:**

[npuht@ukr.net](mailto:npuht@ukr.net)

---

---

**ABSTRACT**

Present work is devoted to the effectiveness of a new coolant. This coolant is a composition mixture of liquids with small additions of nanoparticles. These fluids are commonly called nanofluids. They are able to significantly (2—3 times) increase operating of specific heat flow compared with the critical heat flux of basic fluid, which is an actual problem of modern industry and energy engineering. In this work nanofluids based on natural aluminosilicates from Ukrainian deposits were investigated.

## ДО ПИТАННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ КИПІННІ НАНОРІДИН З АЛЮМОСИЛІКАТІВ

В.Н. Морару, О.В. Снігур

*Інститут газу НАН України*

А.В. Копиленко

*Національний університет харчових технологій*

О.М. Тимонін, С.В. Сидоренко

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*

У статті досліджено ефективність нових теплоносіїв, якими є композиційні суміші рідин з невеликими добавками наночастинок, які отримали назву нанорідин. Нанорідини здатні суттєво (в 2—3 рази) підвищити робочі питомі теплові потоки порівняно з критичним тепловим потоком для води, що є актуальною проблемою сучасної промисловості й енергетики. У пропонованому дослідженні вивчалися нанорідини, створені на основі природних алюмосилікатів з українських родовищ.

**Ключові слова:** нанорідина, кипіння, питомий тепловий потік, криза кипіння, коефіцієнт тепловіддачі.

Інтенсифікація теплообмінних процесів є однією з актуальних проблем сучасної промисловості й енергетики (атомна енергетика, електроніка, лазери тощо). В усіх вищезгаданих машинах, обладнанні й технологіях виникає потреба інтенсивного відведення тепла. Одним із шляхів вирішення даної проблеми є застосування як теплоносіїв нанорідин, здатних працювати при високих питомих теплових потоках (ПТП).

В останнє десятиріччя значна увага приділяється дисперсіям наночастинок (НЧ) у базових рідинах (зазвичай використовуються традиційні теплоносії), які й отримали назву «нанорідини» (НР). Численні дослідження показали, що в таких штучно створених системах значно зростає величина критичного теплового потоку (КТП), а інтенсивність тепловіддачі при кипінні більша порівняно з базовими рідинами. Механізм підвищення КТП пов'язаний з осіданням і спіканням наночастинок на поверхні кипіння.

Найбільш дослідженими з точки зору КТП є нанорідини на основі оксидів металів. Однак нанорідини, що відповідають усім технічним вимогам сучасної енергетики (висока стабільність властивостей нанорідин в умовах радіації та у випадку повторного кип'ятіння й охолодження в поєднанні з високими технічними характеристиками, впливом на навколишнє середовище та доступність), досліджені ще на достатньо. Дана робота присвячена дослідженню ефективності нових теплоносіїв — нанорідин на основі природних алюмосилікатів з українських родовищ.

**Метою дослідження** є вивчення впливу електричного нагріву НР, форми і анізотропії частинок, а також залежності кипіння-охолодження від наявності диспергенту в НР та його впливу на стабільність, КТП і стан поверхні нагріву.

**Матеріали і методи дослідження.** Об'єктами дослідження є водні нанофлюїди на основі природних алюмосилікатів українських родовищ — монтморилоніту (AlSi-1), атапульгіту (AlSi-5), гідроліти (AlSi-6) та генетичної суміші монтморилоніту й атапульгіту (AlSi-7).

Нанофлюїди отримували шляхом короткочасного (2 хв) ультразвукового диспергування на установці УЗДН-2Т  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$  та  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  — форм алюмосилікатів у дистильованій воді та в 0,05 % мас. розчині неорганічного диспергенту — пірофосфату натрію  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .

Дисперсний склад  $\zeta$ -потенціалу НР визначали з допомогою лазерного кореляційного спектрометра ZetaSizer-3 (Malvern Instrument, UK), а поверхневий натяг — методом пластини Вільгельмі (модифікований тензіометр K6 KRÜSS GmbH, Germany). Стійкість досліджуваних нанодисперсій була оцінена як за величинами їх  $\zeta$ -потенціалу, так і за значеннями висоти електростатичного бар'єру відштовхування  $U/kT$  (рис. 1) на потенціальних кривих взаємодії частинок, розрахованих за рівняннями теорії ДЛФО.

Теплофізичні дослідження НР виконані на спеціально створеному експериментальному стенді, що працює на постійному струмі й управління яким здійснюється комп'ютерною програмою, що дозволяє фіксувати з допомогою ПК у реальному режимі часу всі необхідні параметри критичного режиму [1].

Для визначення температури поверхні нагрівача нами використана залежність питомого опору ніхрому від температури. Всі заміри вихідних та розрахункових величин і розрахунки параметрів (струм, напруга, теплові потоки, коефіцієнт тепловіддачі та ін.) були виконані з допомогою розробленого програмного забезпечення. Комп'ютером синхронно відслідковувались залежності між основними вищеперерахованими величинами й параметрами в реальному часі [2, 3].

### Результати і обговорення.

*Вплив форми і анізотропії алюмосилікатних наночастинок*

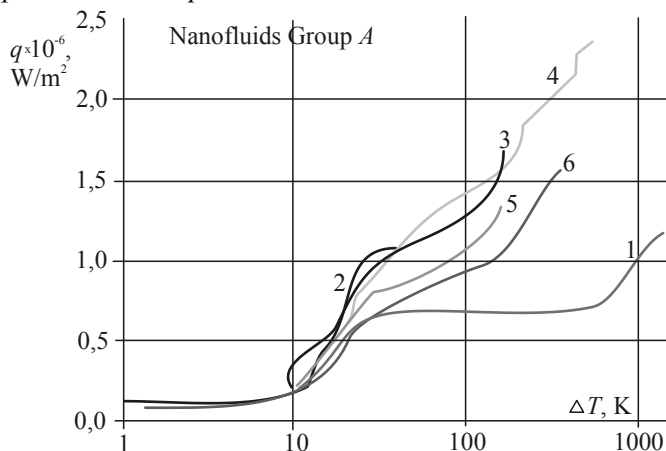


Рис. 1. Криві кипіння для дистильованої води (1) та для нанодисперсій монтморилоніту (2), атапультіту (3), генетичної суміші монтморилоніту й атапультіту (4), гідрослюди (6) та НР з наночастинами  $\text{TiO}_2$  (5)

*Вплив попередньої модифікації поверхні нагріву на величину ПТП при кипінні дистильованої води*

Оскільки теплофізичні властивості НР (в'язкість, поверхневий натяг) практично не відрізняються для таких для води (табл. 1), їхнім впливом на зростання КТП при кипінні НР можна знехтувати.

З метою з'ясування механізму, що лежить в основі підвищення КТП, нами проведено аналіз рельєфу поверхні нагрівача (оптичним і скануючим електронним мікроскопами) після кипіння НР. Якщо при кипінні дистильованої води поверхня нагрівача залишалася чистою, то при кипінні всіх НР різною мірою відбувалося відкладення на ній осаду з наночастинок (рис. 1, 2). Для того, щоб оцінити структуру шару відкладених частинок, на рис. 2 а, б, с наведені ESM-зображення поверхні нагрівання після кипіння досліджуваних НР, з яких для суміші атапультіту та монтморилоніту з максимальним КТП чітко простежується висока шорсткість і пористість каркасу, утвореного укладанням агрегатів частинок у процесі кипіння. У той же час після кипіння НР з частинами гідрослюди та  $\text{TiO}_2$  поверхня нагрівача має більш гладку текстуру, позбавлену пористості, що і пояснює більш низькі значення КТП.

Цілком очевидно, що величина КТП залежить в основному від стану поверхні нагрівання. Як уже зазначалося у [1, 2, 3, 4, 5], пористий шар із наночастинок, відкладених на поверхні, найбільш суттєво впливає на зростання КТП при кипінні НР.

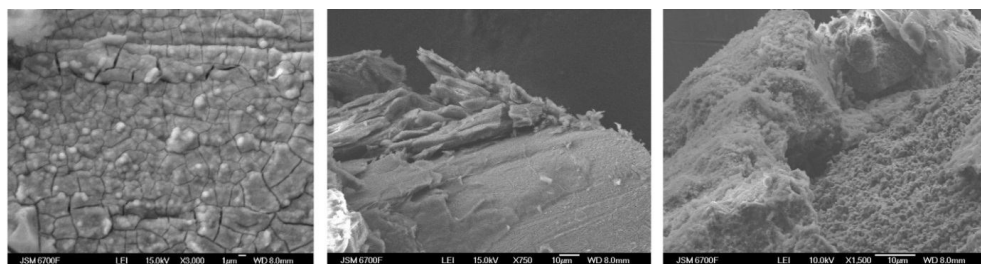


Рис. 2. ESM-зображення поверхні нагріву після кипіння нанофлюїдів гідрослюди (а), генетичної суміші атапульгіту й монтморилоніту (б) і  $\text{TiO}_2$  (с)

Для доказу цього припущення було проведено такий експеримент: на установці, яка працює на постійному струмі, була записана крива кипіння для НР монтморилоніту до настання кризових явищ, що надало можливість утворити на поверхні нагрівача шар осаду. Даний нагрівач з модифікованою поверхнею в наступному колі працював уже в середовищі дистильованої води.

Отримані криві кипіння наведені на рис. 3.

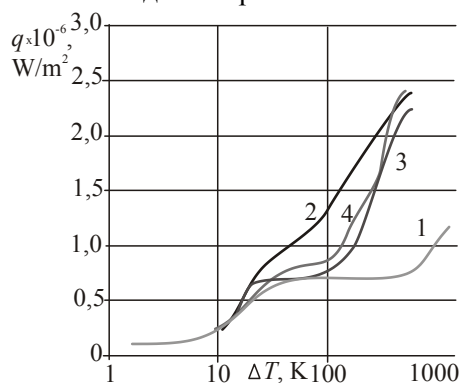


Рис. 3. Криві кипіння для дистильованої води (1) після попереднього кипіння й модифікації поверхні нагрівача в нанодисперсії AlSi-7 (3, 4) і AlSi-7-нанорідини (2)

Як видно з рис. 3, отримані криві кипіння води з модифікованим нагрівачем (3, 4) як за формою, так і за величиною КТП нагадують криву кипіння НР, а не дистильованої води. На них відсутня горизонтальна ділянка, характерна для кризи кипіння води, до того ж вони зміщені праворуч відносно початкової кривої для дисперсії монтморилоніту. Також для кривих 3 і 4 є зміщення відносно одна одної на приблизно 80 К при рівних теплових навантаженнях. Різниця в температурі ( $\Delta T$ ) між цими двома кривими вказує на те, що частина мінеральних часток з поверхні ніхромового нагрівача все ж вимивається при кипінні, відповідно, температури нагрівача в I і II дослідях з дистильованою водою різні при інших рівних параметрах

*Особливості зміни коефіцієнта тепловіддачі при кипінні НР*

Аналіз кривих (рис. 4) показує, що числові значення коефіцієнта тепловіддачі для НР вищі, ніж у дистильованої води в 1,5—1,7 раза в діапазоні зміни температур  $T=50\text{—}300\text{ }^\circ\text{C}$ , коли питомий тепловий потік НР починає перевищувати КТП для дистильованої води (рис. 4). Це пов'язано з тим, що

бульбашкове кипіння продовжується, але вже на пористій поверхні, утвореній динамічним шаром наночастинок. При кипінні НР, коли шар осаду сформовано, спостерігається відсутність як першої, так і другої кризи кипіння, характерної для води.

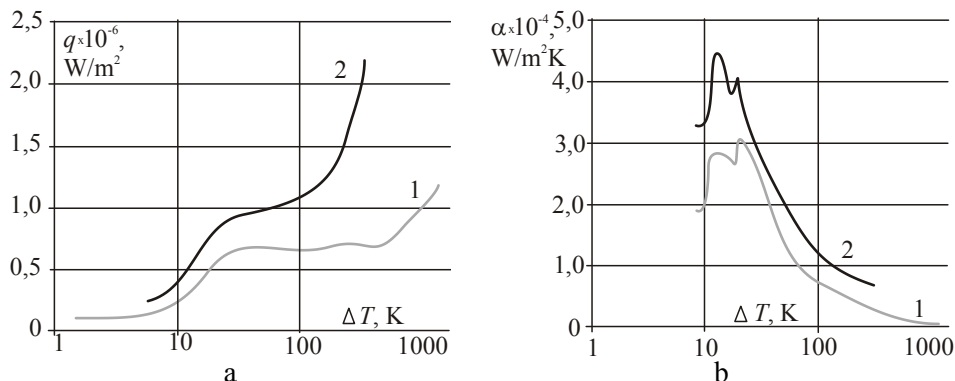


Рис. 4. Залежність питомого теплового потоку (а) і коефіцієнта тепловіддачі (б) для дистильованої води (1) та нанорідини з частинами монтморилоніту (2) від температурного напору

### Висновки

В автоматичному режимі підвищення навантаження отримано криві кипіння для водно-алюмосилікатних нанофлюїдів і визначено величини їх КТП, які в 1,5—3 рази перевищують КТП базової рідини (води). Виявлено, що величина максимально досяжних ПТП при кипінні алюмосилікатних НР тим вища, чим більший коефіцієнт анізотрії наночастинок. Це пояснюється тим, що під час кипіння НР із анізотричними частинами поверхня нагрівача стає більш шорсткою, а шорсткість різко підвищує кількість центрів парутворення. Встановлено, що НР на основі атапульгіту більш стабільні до тривалого й багатократного кипіння-охолодження та до коагулюючої дії постійного струму порівняно з НР на основі монтморилоніту, що пояснюється їх різною кристалічною будовою.

### Література

1. Forrest E., Williamson E., Buongiorno J., Lin-Wen Hu, Rubner M., Cohen R. Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings. — International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2010. — V. 53, Is. 1—3. — P. 58—67.
2. Yen-Wen lu and Satish G. Kandlikar. Nanoscale Surface Modification Techniques for Pool Boiling Enhancement-A Critical Review and Future Directions Heat Transfer Engineering. — 2011. — 32 (10). — P. 827—842.
3. До питання теплообміну при кипінні нанорідин / С.В. Сидоренко, В.Н. Морару, О.В. Снігур [та ін.] // Матеріали 79 Міжнарод. наук. конф. молодих вчених, аспірант. і студентів «Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у XXI ст.», Київ: НУХТ, 2013 р. — Ч. 2. — С. 179—181.

4. Роль отложенного слоя наночастиц в интенсификации теплообмена при кипении наножидкостей / Б.И. Бондаренко, С.В. Сидоренко, В.Н. Морару [та ін.] // Материалы Международной на учно-технической конференции «Энергоэффективность-2013», 14—16 октября 2013 г. Киев, НАН Украины. — С. 41.

5. A. Kopylenko, A. Marinyan, S. Sydorenko, V. Moraru. Investigation of a heat transfer mechanism and heat exchange intensity at some nanofluids boiling // The Second North and East European Congress on Food (NEEFood — 2013). — Kyiv, NUFT, Book of Abstracts. — P. 255.

## **К ВОПРОСУ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НАНОЖИДКОСТЕЙ ИЗ АЛЮМОСИЛИКАТОВ**

**В.Н. Морару, А.В. Снигур**

*Институт газа НАН Украины*

**А.В. Копиленко**

*Национальный университет пищевых технологий*

**А.М. Тимонин, С.В. Сидоренко**

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

*В статье исследованы новые теплоносители — композиционные смеси жидкостей с небольшими добавками наночастиц, которые получили название наножидкостей. Наножидкости способны существенно (в 2—3 раза) повысить рабочие удельные тепловые потоки по сравнению с критическим тепловым потоком для воды, что является актуальной проблемой современной промышленности и энергетики. В данной работе изучались наножидкости, созданные на основе естественных алюмосиликатов из украинских залежей.*

**Ключевые слова:** наножидкость, кипение, удельный тепловой поток, кризис кипения, коэффициент теплоотдачи.