

УДК 541.182:620.3

**Квасницький Б.А.¹, Борисов В.О.¹, Хлієв Н.О.², Желєзний В.П.^{1*},
Гоцульський В.Я.², Муратов Н.Н.³**

¹Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

²Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, Одеса, Україна

³Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна

*e-mail: zheleznyv@gmail.com

Експериментальне дослідження впливу технологічних аспектів двоступеневої технології приготування нанофлюїдів на їх стабільність

Нанофлюїди (НФ) можна розглядати як перспективні робочі тіла та теплоносії для енергетичних систем. Домішки наночастинок (НЧ) у рідинах суттєво впливають на їх теплофізичні властивості. Для НЧ, які мали контакт із навколишнім середовищем, характерна наявність сорбованого поверхневого шару з різних компонентів повітря. На сьогоднішній день вплив сорбованого на поверхні НЧ шару на колоїдну стабільність отриманого НФ не досліджено. У статті показано, що попереднє видалення сорбованих на НЧ компонентів повітря сприяє отриманню НФ з підвищеною колоїдною стабільністю. Експериментальні дослідження процесу десорбції НЧ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, що зберігалися в умовах навколишнього середовища, показали, що сорбційний шар складається в основному з води. Розроблено методiku приготування НФ. Ця методика включає попередню обробку НЧ вакуумуванням з нагріванням до 200 °С та подальше багаторазове повторення процесів дроблення НЧ в бісерному млині з рідиною і за допомогою ультразвукового диспергатора. Виміряний гідродинамічний розмір (DLS) агрегатів НЧ у НФ, отриманому за зазначеною вище методикою, був меншим, ніж для аналогічного НФ, приготовленого без попередньої обробки НЧ. Отримані результати сприятимуть удосконаленню технології виготовлення колоїдно-стабільних робочих тіл та теплоносіїв для енергетичних систем з високою енергетичною ефективністю.

Ключові слова: нанофлюїд; наночастинок (НЧ) $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; агрегативна стабільність; абсорбований шар

1. Вступ. Однією з проблем у розробці сучасних систем охолодження мікроелектроніки та енергетичного обладнання є створення нового покоління теплоносіїв, які мають певні технологічні та теплофізичні властивості. Традиційні методи підвищення інтенсивності теплообміну [1] значною мірою вичерпали свій економічний та еколого-енергетичний потенціал. Тому інноваційну перспективу для вирішення цих проблем має концепція застосування нанофлюїдів як теплоносіїв [2-4].

Нанофлюїди (НФ) відносять до класу стійких гетерогенних термодинамічних систем, який часто отримують шляхом диспергування наночастинок (НЧ) з різних матеріалів в базових рідинах [5, 6]. Як показують численні дослідження, наявність навіть незначної кількості НЧ у рідині сприяє неадитивній зміні її теплофізичних властивостей [5-9]. Цей ефект зумовлений як взаємодією НЧ між собою, так і міжмолекулярною взаємодією НЧ із базовою рідиною [5]. Додатковий вплив на надлишкові термодинамічні функції НФ має зміна структури рідкої фази в присутності НЧ [10, 11], а також наявність поверхневого шару молекул базової рідини або поверхнево активних речовин на НЧ [7].

Як показують численні експериментальні дослідження, наявність домішок НЧ сприяє збільшенню теплопровідності, температуропровідності, в'язкості базових рідин [3, 5-9], зміні їх теплоємності та різниці ентальпії при фазових переходах [7-9], а так само інтенсифікації тепловіддачі як при конвекції, так й при фазових переходах у НФ [2-4, 9]. Тому НФ мають великий інноваційний потенціал застосування у багатьох галузях промисловості.

Проте реалізація потенційних переваг НФ при її впровадженні у промисловість досі стримується низкою технологічних проблем [5, 8, 9, 12]. Однією з найважливіших невирішених проблем залишається відсутність регламентованих технологій отримання стабільних у часі НФ різного складу.

Незважаючи на велику кількість публікацій, присвячених технологіям отримання НФ [5, 6, 8, 9, 12], проблема їх стабільності в часі далека від свого вирішення. Крім того, саме цією обставиною пояснюються великі відхилення експериментальних даних щодо теплофізичних властивостей НФ навіть однакового хімічного складу та розміру НЧ. У процесі експлуатації обладнання з НФ агломерація НЧ призводить до засмічення теплообмінних поверхонь та мікроканалів. Таким чином, вивчення стабільності НФ є ключовим питанням, яке впливає на розробку рекомендацій щодо практичного застосування нанотехнологій у промисловості.

Накопичений досвід приготування НФ при реалізації двоступеневої технології [8, 9, 12] показує, що формування міцел в НФ значною мірою залежить від підготовки базової рідини та НЧ перед їх змішуванням. Слід підкреслити, що НЧ мають велику пористість, є хорошими сорбентами. Тому при контакті з вологим повітрям у процесі зберігання на поверхні НЧ можуть сорбуватися молекули повітря і води. Сорбований шар, що утворюється на поверхні НЧ, бере участь у міжмолекулярній взаємодії з базовою рідиною. Очевидно, що наявність цього шару впливає на процес формування міцел у базовій рідині. Ефект наявності сорбційного шару на поверхні НЧ та його вплив на агрегативну стійкість НФ залишається недостатньо вивченим.

У поданій статті автори досліджували вплив деяких факторів, що сприяють отриманню стійких у часі нанофлюїдів при реалізації двоступеневої технології їх приготування.

2. Матеріали та методи. Для дослідження процесу адсорбції компонентів повітря на поверхні НЧ використовувалися наноматеріали виробника WenZhou JingCheng Chemicals Co.,ltd. Технічні характеристики наночастинок α - Al_2O_3 (за даними виробника) наступні:

- чистота 99.99%;
- розмір НЧ 10 ± 5 нм;
- питома поверхня (визначена БЕТ методом низькотемпературної адсорбції) $8.7 \text{ м}^2/\text{г}$.

Як базова рідина використовувався ізопропанол (CAS: 67-63-0, SigmaAldrich, чистота 99.7%).

Маса визначалася з використанням електронних аналітичних ваг AND GR-300 з невизначеністю ± 0.0005 р. Механічне дроблення НЧ в рідині проводили в

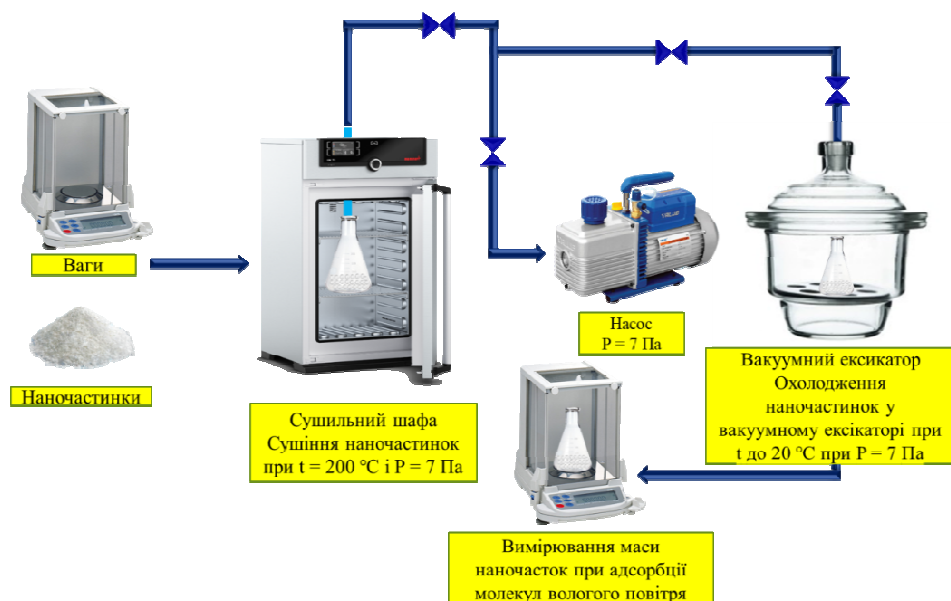


Рис. 1. Технологічна схема дослідження кількості адсорбованих компонентів вологого повітря на поверхні НЧ

бісерному млині, заповненому кульками ZrO_2 діаметром 2 мм. Ультразвукову обробку проводили за допомогою ультразвукової ванни Codison CD 4800 (частота 42 кГц, потужність 0.07 кВт).

3. Результати дослідження та дискусія. Наявність сорбованих у процесі виробництва та зберігання компонентів повітря на поверхні НЧ може впливати на агрегативну та седиментаційну стабільність НФ, що приготувані з їх використанням. Ця проблема нині недостатньо вивчена.

Методика проведення дослідження впливу сорбованих компонентів повітря на поверхні НЧ на стабільність НФ складалася з двох етапів: дослідження кількості сорбованих компонентів повітря на НЧ та дослідження впливу попереднього видалення сорбційного шару на НЧ на стійкість одержуваних НФ.

На першому етапі визначалася питома маса сорбованих на поверхні НЧ компонентів вологого повітря. Технологічна схема проведення дослідження наведена на рис. 1.

У процесі дослідження всі типи НЧ піддавалися впливу вологого повітря навколишнього середовища (температура $15\text{...}16\text{ °C}$, відносна вологість $55\text{...}77\%$) при їх зберіганні у відкритих ємностях. Після завершення процесу сорбції компонентів вологого повітря зразки НЧ піддавалися процедурі десорбції. НЧ нагрівали до 200 °C у сушильній шафі при безперервному вакуумуванні до 2 Па протягом 120 хв. З метою виключення повторної сорбції компонентів повітря на НЧ охолодження зразків здійснювалося у вакуум-ексикатор при 2 Па. Після охолодження було досліджено динаміку зміни маси зразків НЧ при контакті з вологим повітрям (температура $15\text{...}16\text{ °C}$, відносна вологість $55\text{...}77\%$) – рис. 2.

Отримані результати показують, що на поверхні НЧ сорбується доволі велика кількість компонентів вологого повітря. Оскільки поверхня НЧ окси-

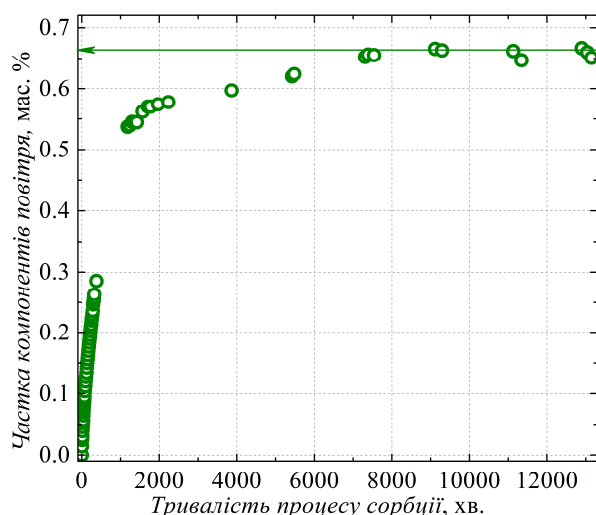


Рис. 2. Залежність масової частки компонентів вологого повітря, сорбованих на поверхні НЧ, від часу в умовах навколишнього середовища

дівметалів електрично заряджена, сорбційний шар складається в основному з води, що має найбільший дипольний момент із усіх компонентів вологого повітря. Гази, що відкачувалися у процесі десорбції, охолоджувалися в криогенній вакуумній пастці. Проведені вимірювання показника заломлення зібраного конденсату дозволили визначити, що сорбований на поверхні НЧ шар складається з чистої води. Маса зібраного конденсату була порівнювана (в межах невизначеності) з масою компонентів вологого повітря, що поглинався зразками НЧ протягом тривалого контакту з вологим повітрям в умовах навколишнього середовища.

Аналізуючи отримані дані, слід враховувати, що розміри НЧ у порошок суттєво відрізняються від розміру, що вказується виробником. Так, наприклад, для товарного зразка НФ ізопропанол/ Al_2O_3 (CAS № 1344-28-1, SigmaAldrich), еквівалентний розмір НЧ в ізопропанолі, визначений методом динамічного розсіювання світла за даними виробника становить 50 нм. У той же час розміри сухих НЧ Al_2O_3 (просвічуючий електронний мікроскоп), що були отримані після випарювання ізопропанолу, істотно відрізнялися [7].

Розподіл зарядів у НЧ визначається функціональним зв'язком щільності негативних та позитивних зарядів усередині НЧ та електронів на їх поверхні [13]. На відміну від масивних матеріалів, поява надмірної кількості електронів на поверхні НЧ призводить до накопичення додаткової кулонівської енергії, порівнянної з енергією когезії кластера. Оскільки електричний заряд на поверхні НЧ обернено пропорційний її розміру, масова частка і товщина адсорбційних шарів залежить, не тільки від параметрів вологого повітря, а й від розміру НЧ, матеріалу та їх питомої поверхні. У рамках розглянутої моделі можна припустити, що НЧ із сорбованим шаром прагнуть набути сферичної форми. Таким чином, маючи значення середнього розміру НЧ, можна розрахувати характерні параметри сорбційного шару. Для розрахунків був прийнятий молекулярний діаметр води 0.264 нм. Отримані параметри сорбційного шару на поверхні НЧ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ усередненого розміру наступні:

- масова частка сорбованої води – 0,66 мас. %;
- маса сорбованого шару на поверхні НЧ – $6,85 \cdot 10^{-18}$ г;
- діаметр НЧ з сорбованим шаром – 13.32 нм;
- товщина сорбованого шару на поверхні НЧ - 1,66 нм;
- кількість молекулярних сорбційних шарів - 6.

З наведеної інформації випливає, що характерні параметри сорбційного шару залежать від тривалості процесу сорбції, розміру НЧ, а також їх питомої

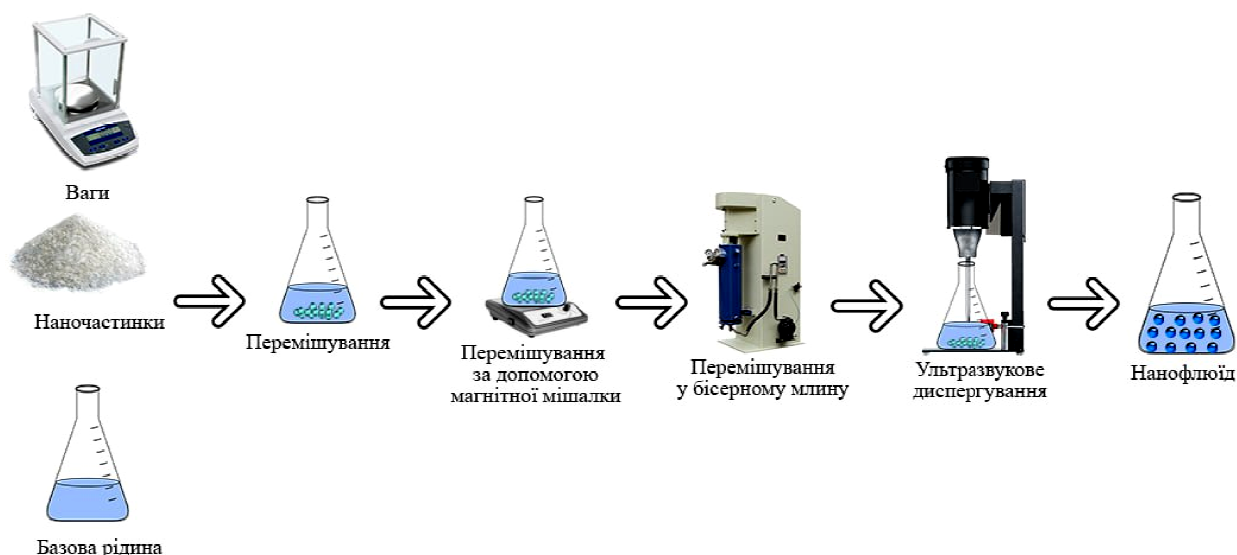


Рис. 3. Технологічна схема створення зразків нанофлюїдів

поверхні. Крім того, на процес сорбції газів на НЧ впливають параметри навколишнього середовища (температура, тиск, вологість повітря).

На наступному етапі експериментальних досліджень вивчався вплив технологічних аспектів отримання НФ на середній розмір НЧ у базовій рідині та на агрегативну стабільність одержуваних НФ.

Зразки НФ отримували з використанням двоступеневої технології шляхом змішування НЧ з ізопропанолом. Між компонентами НФ відбуваються Ван-дер-Ваальсові взаємодії. Стійкість НФ до агрегації визначається як енергетичною взаємодією між зарядженою поверхнею НЧ та сорбованими на їх поверхні молекулами води, так і сорбційного шару з полярними молекулами ізопропанолу, а також броунівським рухом та кулонівськими силами. На співвідношення між переліченими факторами енергетичної взаємодії впливають як параметри стану, в якому знаходиться НФ, так і різні технологічні фактори реалізації двоступеневої технології одержання НФ. Технологічна схема створення зразків НФ наведена на рис. 3.

В рамках реалізації двоступеневої технології приготування НФ використовувалися кілька етапів: перемішування ізопропанолу та НЧ магнітною мішалкою, подрібнення агрегатів НЧ у середовищі ізопропанолу у бісерному млині та ультразвукове диспергування. Час технологічної обробки суміші ізопропанолу з НЧ на кожному етапі варіювався з метою вивчення впливу різних технологічних чинників на стабільність одержуваних НФ.

У проведених дослідженнях при приготуванні НФ використовувалися два види НЧ: без попередньої десорбції компонентів повітря та НЧ, піддані десорбції (відповідно до технологічної схеми на рис. 1).

До основних факторів, що перешкоджають створенню агрегативно стабільних у часі НФ, можна віднести:

- агрегацію НЧ у процесі їх зберігання (чому сприяє наявність сорбованих на їх поверхні компонентів вологого повітря);
- широкий інтервал розподілу за розмірами товарних НЧ;

Таблиця 3. Технологічні аспекти застосованих процесів приготування нанофлюїдів *

Технологія 1
УЗ 105 хв. => БМ 570 хв. => ММ 600 хв. => УЗ 330 хв.
Технологія 2
ММ 420 хв. => БМ 510 хв. => УЗ 320 хв.
Технологія 3
УЗ 105 хв. => БМ 570 хв. => ММ 600 хв. => УЗ 330 хв. => зберігання 7 діб => БМ 510 хв. => УЗ 320 хв.

* ММ - перемішування магнітною мішалкою; УЗ – ультразвукове диспергування; БМ - обробка в бісерному млині

- схильність НЧ до агрегації через сильні Ван-дер-Ваальсівські сили в базовій рідині;

- наявність у базовій рідині розчинених газів та домішок, які можуть сорбуватися на поверхні НЧ.

Технологічні аспекти застосування процесів приготування зразків НФ наведено в табл. 3.

У кожній із застосованих технологій створення НФ використовувався етап обробки компонентів суспензії ізопропанолу з НЧ у бісерному млині. В результаті перемелювання агрегатів НЧ у млині в них утворюються тріщини, і відбувається часткове руйнування. На етапі ультразвукової диспергації в результаті кавітаційних явищ у рідині відбувається додаткове руйнування агрегатів НЧ за цими тріщинами. Слід зазначити, що поєднання ультразвукової обробки та подрібнення в бісерному млині досі не набуло широкого поширення, хоча розглядається у ряді робіт [14, 15]. Очевидно, що обробка суспензій базова рідина/НЧ у бісерному млині сприятиме зменшенню середнього розміру НЧ, руйнуванню агрегатів і, тим самим, підвищенню стабільності отримуваних НФ [14, 15].

Як показники стійкості НФ досліджувалася залежності спектральних коефіцієнтів пропускання світла від часу зберігання зразків. Вимірювання спектральних коефіцієнтів пропускання світла проводилися спектрофотометром Ulab 102 при довжинах хвиль від 400 до 1000 нм.

Слід зазначити, що оптична неоднорідність НФ залежить не тільки від присутності у ньому диспергованих НЧ. Навіть у середовищах, які з макроскопічної точки зору можна вважати однорідними, присутні локальні неоднорідності через хаотичний тепловий рух молекул. Тому в рівних локальних об'ємах міститься різна кількість частинок, що призводить до утворення флуктуацій густини. Як показують проведені нещодавно дослідження, присутність НЧ у базовій рідині сприяє зміні її флуктуацій густини [10]. У НФ, крім флуктуацій густини базових рідин, можуть виникати флуктуації концентрації НЧ. Через це НФ є оптично неоднорідними системами.

Інтенсивність і просторовий розподіл розсіяного випромінювання залежать від співвідношення між довжиною падаючої хвилі і розміром частинок d . Тому розсіювання світла залежатимуть від розподілу НЧ у базовій рідині за розміром та довжини хвилі світла. Пружне розсіювання світла на НЧ розміром значно

менше довжини хвилі ($d < \lambda/15$), формує розсіювання Релея. Таким чином, залежності спектральних коефіцієнтів пропускання від часу, виміряні для одержаних за різними технологіями зразків НФ, дозволяють досліджувати динаміку зміни їх стабільності.

Отримані залежності спектральних коефіцієнтів пропускання від часу зберігання зразків НФ в оптичних кюветах з довжиною оптичного шляху 3,087 мм демонструють рис. 4-7.

Приготовлені за технологією 1 НФ не стійкі (коефіцієнти пропускання змінюються з часом) – рис. 4. Швидкість осадження НЧ різних розмірів відрізняється. Великий розкид розмірів НЧ у НФ був зафіксований для обох зразків у результаті виміру радіусу методом ДРС (динамічного розсіювання світла). Середній гідродинамічний радіус для обох зразків відрізнявся незначно, в середньому становив близько 200 нм.

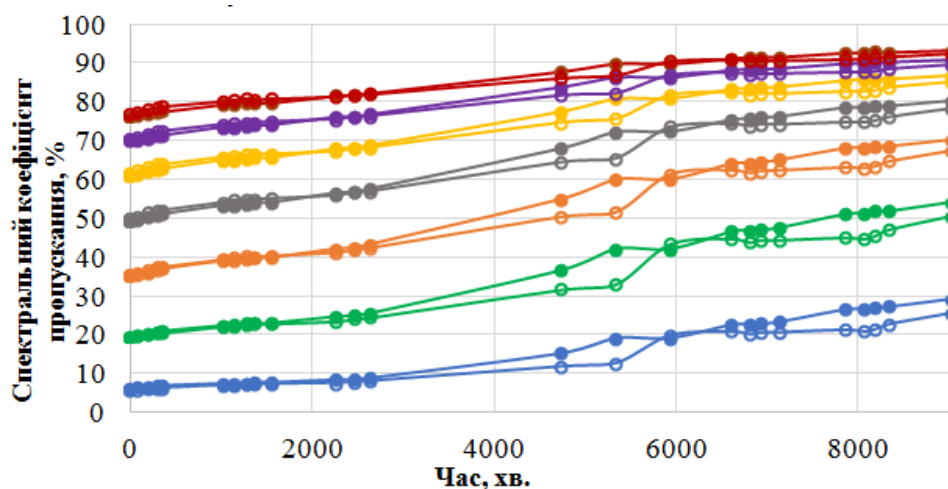


Рис. 4. Залежність спектральних коефіцієнтів пропускання для НФ ізопропанол/ Al_2O_3 0,2 мас. %, що були приготовані за технологією 1:

● – недеаеровані НЧ, ○ – деаеровані НЧ; довжина хвилі у нм:
 — 400 — 500 — 600 — 700 — 800 — 900 — 1000

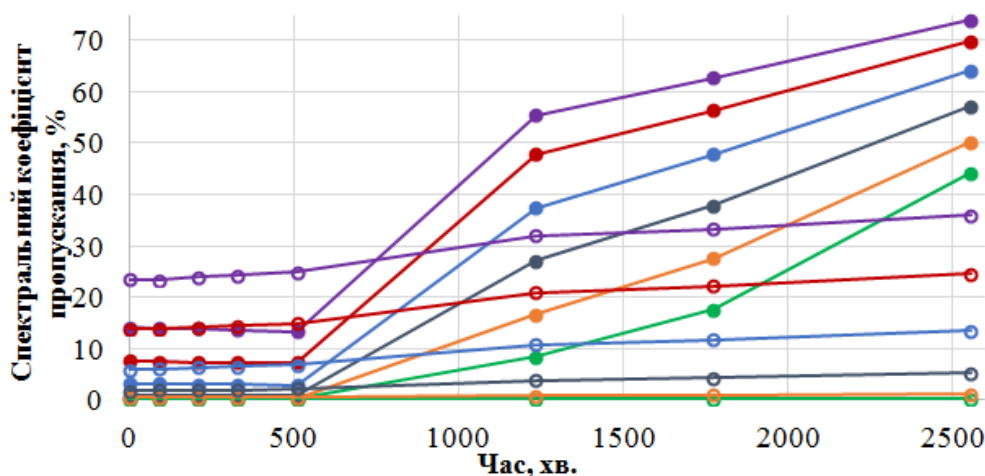


Рис. 5. Залежність спектральних коефіцієнтів пропускання для НФ ізопропанол/ Al_2O_3 0,5 мас. %, що були приготовані за технологією 2:

● – недеаеровані НЧ, ○ – деаеровані НЧ; довжина хвилі у нм:
 — 500 — 600 — 700 — 800 — 900 — 1000

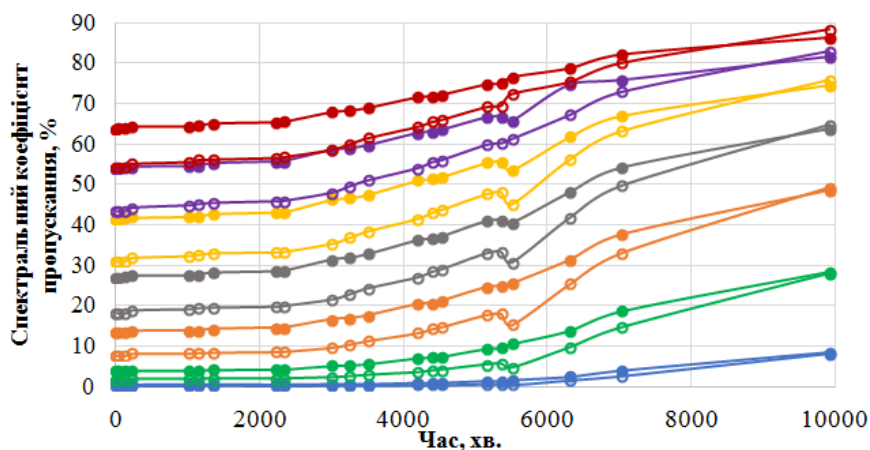


Рис. 6. Залежність спектральних коефіцієнтів пропускання для НФ ізопропанол/ Al_2O_3 0.5 мас. %, що були приготовані за технологією 2:

● – недеаеровані НЧ, ○ – деаеровані НЧ; довжина хвилі у нм:

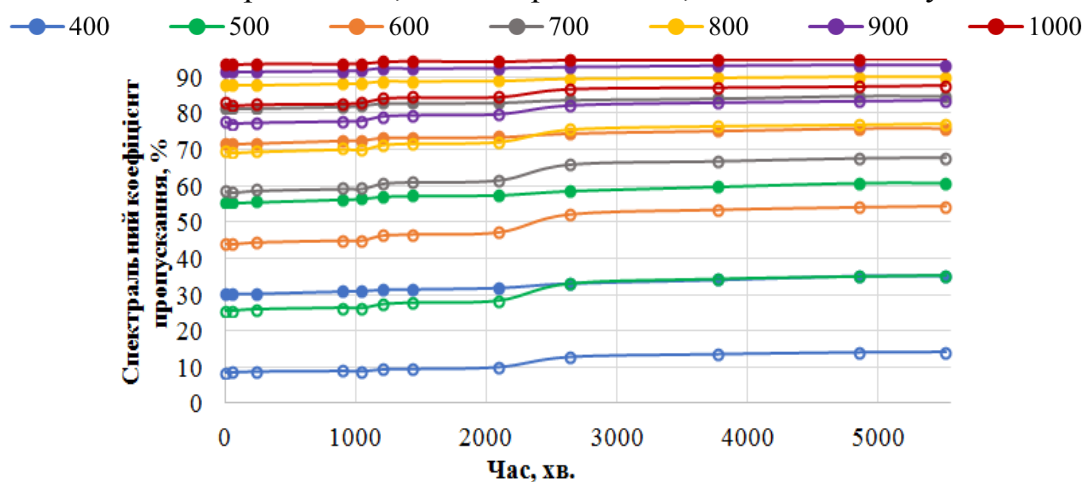


Рис. 7. Залежність спектральних коефіцієнтів пропускання для НФ ізопропанол/ Al_2O_3 0,2 мас. %, що були приготовані за технологією 3:

● – недеаеровані НЧ, ○ – деаеровані НЧ; довжина хвилі у нм:

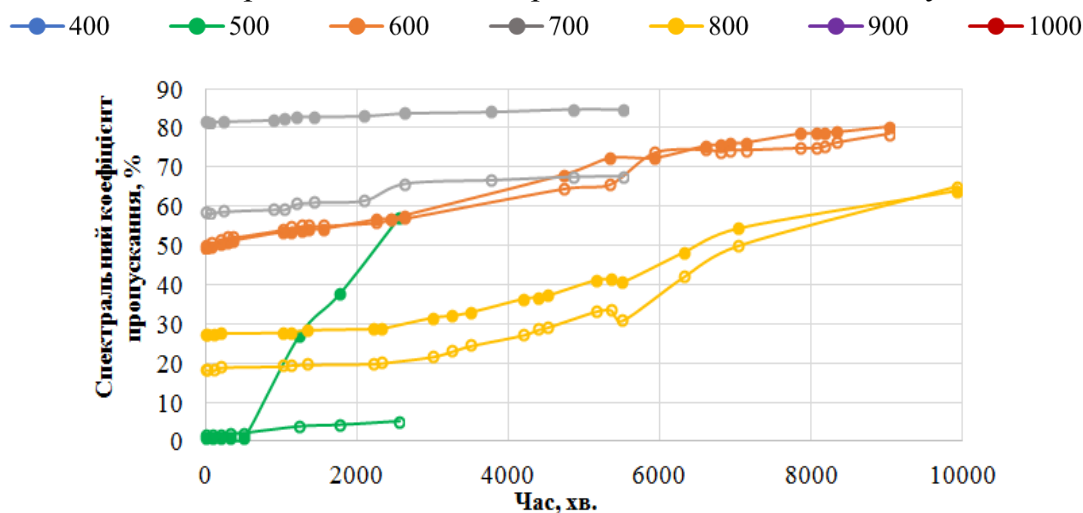


Рис. 8. Залежність спектральних коефіцієнтів пропускання світла з довжиною хвилі 700 нм для НФ ізопропанол/ Al_2O_3 , що були приготовані за різними технологіями: ● – недеаеровані НЧ, ○ – деаеровані НЧ;

—●— технологія 1, —●— технологія 2 (перші зразки), —●— технологія 2 (другі зразки), —●— технологія 3

Приготовлені за технологією 2 зразки НФ зберігали стабільність до 500 хв. – рис. 5. Причому різкий стрибок спектральних коефіцієнтів пропускання, отже, зниження агрегативної та седиментаційної стабільності, спостерігалось тільки для зразка, приготовленого їх недеаерованих НЧ. Слід зазначити, що для деаерованих НЧ спостерігалася більша стабільність НФ. Вимір гідродинамічного радіусу НЧ методом ДРС зафіксував великий розкид розмірів НЧ в НФ для обох зразків. Середній гідродинамічний радіус становив 239 нм для зразка з недеаерованих НЧ та 200 нм для зразка з деаерованих НЧ. Отримані результати підтверджують доцільність попередньої обробки НЧ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ для видалення сорбованої вологи перед приготуванням НФ.

Повторно приготовлені за технологією 2 зразки НФ протягом перших п'яти днів були відносно стабільні (спектральні коефіцієнти пропускання незначно збільшувалися з часом) – рис. 6. На шостий день вимірювання стався стрибок із збільшенням значень спектральних коефіцієнтів пропускання, можливо пов'язаний із зміною температури. Надалі великі НЧ почали випадати в осад і стабільність погіршувалась.

Так як приготовлені за технологією 2 НФ відрізнялися за стабільністю (рис. 5 і 6), був зроблений висновок, що великий вплив на стабільність оказують як незначні відхилення у проведенні технологічних процесів (різна ступінь нагріву НФ при ультразвуковій обробці, різний об'єм НФ і т.п.), так й параметри навколишнього середовища.

Приготовлені за технологією 3 зразки НФ відрізнялися підвищеною стабільністю – рис.7. Причому для НФ, приготовленого з деаерованих НЧ, спостерігався невеликий стрибок коефіцієнтів пропускання, пов'язаний, очевидно, з осіданням великих НЧ. Однак у подальшому стабільність зберігалася. Спектральні коефіцієнти пропускання для НФ, приготованих з недеаерованих НЧ відразу після приготування були вищими, ніж для НФ з деаерованих НЧ. Пояснюється це тим, що в процесі приготування не вдалося досягти високої дисперсності НФ, значна частина агломератів НЧ осіла ще в процесі підготовки до вимірювань, що й сприяло кращому пропусканню світла цим зразком. Вимір гідродинамічного радіусу для НФ з недеаерованих НЧ показало, що середній розмір НЧ становить 240 нм (після механічного перемішування). Однак після зберігання зразка протягом 10 діб НЧ повністю випали в осад. Вимір гідродинамічного радіусу для НФ з деаерованих НЧ дало середній розмір 167 ± 7 нм. Після зберігання зразка протягом 10 днів спостерігалася візуальна різниця оптичної густини за висотою комірки з НФ, без щільного осаду (на відміну від НФ з недеаерованих НЧ). Однак після перемішування зразка повторне вимірювання гідродинамічного радіусу дало середній розмір НЧ 167 ± 7 нм. Отриманий результат підтверджує відсутність коагуляції НЧ та може бути пояснений утворенням шару з молекул базової рідини на поверхні НЧ. Очевидно, цей шар веде себе як поверхнево-активна речовина в аналізованому НФ.

Залежність спектральних коефіцієнтів пропускання при довжина хвилі 700 нм від часу (стабільність зразків) для НФ, що були приготовлені за різними технологіями, демонструє рис. 8.

На рис. 8 звертає на себе увагу той факт, що НФ, які були приготовані за технологією 2 (другий зразок) та 3 з початку вимірювань при рівній концентрації НЧ відрізнялись значенням коефіцієнта пропускання. Отриманий результат пояснюється різною дисперсністю НЧ у НФ, що були отримані за однаковою технологією, але з використанням попередньо деаерованих та недеаерованих НЧ.

Аналіз одержаних результатів дозволяє сформулювати кілька висновків. По-перше, залежності спектральних коефіцієнтів пропускання світла від часу зберігання зразків вказують, що перша та друга технології приготування НФ не забезпечують отримання стабільних зразків. Слід зазначити, що швидкість зміни спектральних коефіцієнтів пропускання, отже, і швидкість осадження різних за розміром НЧ, відрізняється для різних технологій – рис. 4-7.

По-друге, слід звернути увагу на вплив на стійкість НФ часу ультразвукового та механічного диспергування. На рис. 5 і 6 є чітко виражена горизонтальна ділянка на залежностях спектральних коефіцієнтів пропускання світла, яка вказує на факт метастабільної стійкості приготовлених зразків НФ на значному інтервалі часу. Факт спонтанного порушення стійкості НФ, на думку авторів, може бути пов'язаний із зміною температури навколишнього середовища, як наслідок, в'язкості НФ.

По-третє, у проведених дослідженнях було одержано підтвердження гіпотези про суттєвий вплив сорбційного шару компонентів вологого повітря на поверхні НЧ на стійкість НФ. Швидкість зміни спектральних коефіцієнтів пропускання в процесі зберігання приготовлених за різними технологіями зразків істотно нижче для НФ, в яких НЧ піддані попередньої деаерації.

По-четверте, проведені дослідження показують, що чергування тривалої обробки НЧ у бісерному млині та ультразвуковому диспергаторі сприяє отриманню стійких НФ (технологія 3). Причому навіть процедура зберігання отриманого за технологією 1 зразка протягом 7 днів, не перешкодила після додаткового диспергування отриманню стійкого НФ (таблиця 3, порівняння технологій 1 і 3). Очевидно, в процесі зберігання НФ у сформованому в нижній частині оптичних кюветок шарі відбуваються процеси поступового руйнування агрегатів НЧ за рахунок розклинюючого тиску у тонкому шарі ізопропанолу, що знаходиться між НЧ. Крім того, напевно, тривають процеси формування міцел.

Висновки. Проведено експериментальне дослідження впливу сорбованих на поверхні НЧ компонентів вологого повітря на агрегативну та седиментаційну стабільність НФ. З отриманих результатів можна сформулювати наступні висновки.

1. НЧ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, що зберігалися в умовах навколишнього середовища, містять сорбційний шар, що складається переважно з води.
2. Попередня обробка НЧ з метою видалення сорбованих компонентів вологого повітря (нагрівання та вакуумування) перед приготуванням НФ сприяє отриманню НФ з підвищеною колоїдною стабільністю.
3. Запропоновано методику приготування НФ, що включає в себе попередню обробку НЧ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ вакуумуванням з нагріванням до 200 °С, змішування з

рідиною, з подальшим перемішуванням в магнітній мішалці і далі багаторазовим чергуванням диспергування в бісерному млині та ультразвуковій обробці НФ.

Автори висловлюють подяку Національному фонду досліджень України за фінансову підтримку цього дослідження у рамках проекту № 2020.02/0125.

Література:

1. *Sadeghianjahromi A., Wang C. C.* Heat transfer enhancement in fin-and-tube heat exchangers—A review on different mechanisms // *Renewable Sustainable Energy Rev.*— 2021. —Vol. 137. — P. 110470. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110470>
2. *Bakthavatchalam B., Habib K., Saidur R., Saha B. B., Irshad K.* Comprehensive study on nanofluid and ionanofluid for heat transfer enhancement: A review on current and future perspective // *J. Mol. Liq.* . — 2020. Vol. 305. — P.112787. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112787>
3. *Nikulin A., Moita A. S., Moreira A. L. N., Murshed S. M. S., Huminic A., Grosu Y., ... Khliyeva O.* Effect of Al₂O₃ nanoparticles on laminar, transient and turbulent flow of isopropyl alcohol // *Int. J. Heat Mass Transfer.* — 2019. — Vol. 130. — P. 1032-1044. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.114>
4. *Lamosa R. A., Motovoy I., Khliiev N., Nikulin A., Khliyeva O., Moita A. S., ... del Barrio Elena P.* Tetralin+ fullerene C₆₀ solutions for thermal management of flat-plate photovoltaic/thermal collector // *Energy Convers. Manage.*— 2021. — Vol. 248. — P. 114799. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114799>
5. *Железний В.П., Семенюк Ю.В., Хлиева О. Я., Лукьянов Н.Н., Никулин А.Г., Никулина А.С.* Перспективы применения нанотехнологий в холодильной технике. Часть 1. Теплофизические свойства нанофлюидов / под ред. В.П. Железного. — Одесса: «Феникс». 2019. — 313с.
6. *Michaelides E.E.S.* Nanofluidics: thermodynamicandtransportproperties. — Springer International Publishing: Switzerland. 2014. — 335 p. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-05621-0>
7. *Zhelezny V., Khliyeva O., Motovoy I., Lukianov N.* An experimental investigation and modelling of the thermal and caloric properties of nanofluids isopropyl alcohol-Al₂O₃ nanoparticles. // *Thermochim. acta.* — 2019. — Vol. 678. — P. 178296. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.05.011>
8. *Dey D., Kumar P., Samantaray S.* A review of nanofluid preparation, stability, and thermo-physical properties // *Heat Transfer-Asian Research.* — 2017. — Vol. 46(8). —P. 1413-1442. <https://doi.org/10.1002/htj.21282>
9. *Mehta B., Subhedar D., Pancha H., Said Z.* Synthesis, stability, thermophysical properties and heat transfer applications of nanofluid—A review. // *J. Mol. Liq.* — 2022. — Vol. 364. — P. 120034. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120034>
10. *Zhelezny V. P., Khanchych K. Y., Motovoy I. V., Nikulina A. S.* On the nonmonotonous behavior of the thermal properties of fullerene C₆₀/o-xylene solutions. // *J. Mol. Liq.* — 2021. — Vol. 338. — P. 116629. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116629>
11. *Zhelezny V., Motovoy I., Khanchych K., Sechenyh V., Hlek Y.* Temperature and concentration dependencies of the saturated vapor pressure for the solutions of nanoparticles AL₂O₃ in isopropanol and fullerenes C₆₀ in o-xylene. // *J. Mol. Liq.* — 2020. — Vol. 319. — P. 114362. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114362>
12. *Chakraborty S., Panigrahi P. K.* Stability of nanofluid: A review // *Appl. Therm. Eng.*— 2020. — Vol. 174. — P. 115259. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115259>

13. Боднева В. Л., Кожушнер М. А., Посвянский В. С., Трахтенберг, Л. И. Теория чувствительности структурированных на наноуровне слоев оксидов металлов к газам-восстановителям //Химическая физика. – 2019. – Т.38, №1. – Р. 75-80.<https://doi.org/10.1134/S0207401X19010060>
14. Choi C. H., Yoo S., Oh J. M. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants. // Current Applied Physics. – 2008. – Vol. 8 (6). –P. 710-712. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2007.04.060>
15. He Y., Jin Y., Chen H., Ding Y., Cang D., Lu H. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50 (11). – P. 2272-2281. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.024>

**B. Kvasnytskyi, V. Borysov, N. Khliiev, V. Zhelezny,
V. Gotsulski, N. Muratov**

Experimental study of the effect of technological aspects of the two-stage method of nanofluids preparation on their stability

SUMMARY

Nanofluids (NFs) can be considered promising working fluids and coolants for power systems. Nanoparticles (NPs) admixtures in liquids significantly affect their thermophysical properties. The NP samples that have been contacted with the ambient air are inhered in the presence of the sorbed surface layer from various air components. For today, the effect of the sorbed layer on the NPs' surface on the colloidal stability of NFs has not been examined. In paper was shown that preliminary removal of the sorbed air components from NPs contributes to obtaining the NFs with enhanced colloidal stability. Experimental studies of the desorption process of the sorbed air components regarding α -Al₂O₃ NPs that were stored under ambient conditions resulted that the adsorption layer consists mainly of water. A technique for the NFs preparation has been developed. This technique involved preliminary NPs treatment by vacuuming together with heating up to 200 °C, following multiple repeats of the processes of NPs milling in a bead mill with liquid and ultrasonication. The measured hydrodynamic size (DLS) of the NPs' aggregates in the NF obtained by the mentioned technique was smaller than for similar NF prepared without NPs pre-treatment. The obtained results will contribute to improving the technique of preparation of the colloidal stable working fluids and coolants for power systems with high energy efficiency.

Keywords: *nanofluid (NF); α -Al₂O₃ nanoparticle (NP); aggregative stability; adsorbed layer*