

ВІДГУК

офіційного опонента - Лазаренка Максима Михайловича
доктора фізико-математичних наук, професора кафедри молекулярної фізики фізичного
факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка

на дисертаційну роботу

Хлієва Нікіти Олександровича

**«Вплив управляючих параметрів на теплофізичні й оптичні властивості нанофлюїдів на
основі фулерену C₆₀ та процеси переносу з ними»**

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 10 - Природничі науки
за спеціальністю 104-фізика та астрономія

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Підвищення ефективності перетворення, перенесення та акумулювання теплоти потребує створення теплоносіїв і функціональних середовищ із керованими теплофізичними та оптичними властивостями. Одним із перспективних напрямів є використання нанофлюїдів – дисперсних систем, у яких введення нанорозмірної твердої фази дає змогу змінювати теплофізичні та оптичні характеристики базової рідини.

Разом із тим властивості нанофлюїдів визначаються сукупною дією концентрації, температури, дисперсного та структурного стану системи. Наявні літературні дані щодо впливу наночастинок на теплопровідність, в'язкість, теплоємність, гідродинаміку та інтенсивність теплообміну нерідко є суперечливими. Для нанофлюїдів на основі фулерену C₆₀ додаткового дослідження потребує взаємозв'язок між оптичними характеристиками, агрегаційним станом частинок, теплофізичними властивостями та процесами переносу імпульсу і теплоти за їх участю.

За таких умов комплексне експериментальне та розрахункове дослідження впливу концентрації, температури й структурного стану нанофлюїдів на основі фулерену C₆₀ на їх властивості та характеристики процесів переносу є науково обґрунтованим. Отже, тема дисертації Хлієва Н. О. є актуальною, відповідає сучасним напрямам фізики дисперсних систем, теплофізики та енергетичних технологій.

Структура і зміст дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Хлієва Н.О. за своїм змістом відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія». Робота є завершеною науковою працею, у якій розв'язано актуальне наукове завдання встановлення закономірностей впливу керувальних параметрів на теплофізичні й оптичні властивості нанофлюїдів на основі фулерену C₆₀ та процеси переносу в них.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі сучасного стану досліджень, обґрунтуванні вибору об'єктів, підготовці зразків, проведенні частини оптичних і структурних вимірювань, обробленні та узагальненні експериментальних даних, створенні CFD-моделі комбінованого фотоелектричного/теплогого колектора, виконанні чисельних розрахунків, інтерпретації результатів та формулюванні висновків. Внесок здобувача у спільні публікації конкретизовано в дисертації.

За характером викладення та наведеними посиланнями дисертаційна робота має ознаки самостійного дослідження. Використані положення, результати та матеріали інших авторів супроводжуються відповідними бібліографічними посиланнями.

Дисертаційну роботу написано українською мовою. Матеріал викладено загалом послідовно та логічно, із використанням стандартної термінології. Текст достатньою мірою ілюстровано графічними матеріалами й таблицями.



Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 151 сторінку, з них 114 сторінок основного тексту. Робота містить 40 рисунків, 7 таблиць, список із 152 використаних джерел та 2 додатки.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, об'єкт, предмет і завдання дослідження, наведено методи, наукову новизну, практичне значення, особистий внесок здобувача, відомості про апробацію та публікації.

У **першому розділі** проаналізовано сучасний стан досліджень теплофізичних і оптичних властивостей нанофлюїдів та процесів переносу в них. Розглянуто механізми впливу наночастинок на макроскопічні властивості рідин, роль концентрації, температури, розміру й форми частинок, особливості вуглецевих наноструктур і перспективи застосування фулерену C₆₀ у системах сонячної енергетики.

У **другому розділі** обґрунтовано вибір об'єктів дослідження, описано технології приготування нанофлюїдів тетралін/C₆₀ і технічний парафін/C₆₀, наведено методи визначення оптичних, калоричних, теплофізичних та структурних властивостей, а також методик дослідження процесів переносу імпульсу і теплоти при течії в каналі.

Третій розділ присвячено комплексному експериментальному дослідженню оптичних, теплофізичних і структурних характеристик нанофлюїдів на основі C₆₀. Визначено оптичні характеристики, густину, в'язкість, теплоємність і теплопровідність нанофлюїду тетралін/C₆₀, а також досліджено калоричні властивості та структуру технічного парафіну з добавками C₆₀.

У **четвертому розділі** досліджено гідродинамічні характеристики та теплообмін при течії нанофлюїду тетралін/C₆₀. Проаналізовано коефіцієнт тертя, втрати тиску, критичне число Рейнольдса, коефіцієнти тепловіддачі та особливості ламінарно-турбулентного переходу.

У **п'ятому розділі** сформульовано математичну модель і виконано чисельне моделювання процесів теплопереносу в комбінованому фотоелектричному/тепловому колекторі з прямим поглинанням випромінювання нанофлюїдом. Проаналізовано вплив концентрації C₆₀ на температурні поля, тепловий баланс і співвідношення між тепловою та електричною ефективністю колектора.

У загальних висновках узагальнено основні наукові результати, які відповідають поставленим завданням.

Дисертаційну роботу в цілому оформлено відповідно до встановлених вимог до кваліфікаційних наукових праць.

Новизна наукових результатів, їх достовірність та обґрунтованість.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в установленні взаємозв'язку між структурними, теплофізичними та оптичними характеристиками нанофлюїдів на основі фулерену C₆₀ і визначенні їх впливу на процеси переносу. До основних наукових результатів роботи належать:

1. Експериментально встановлено придатність спектра поглинання нанофлюїду тетралін/C₆₀ для систем прямого поглинання сонячного випромінювання та комбінованих фотоелектричних/теплових колекторів зі спектральним розділенням енергії завдяки різкому спаданню поглинання поблизу 650 нм.

2. Показано, що введення фулерену C₆₀ з масовою часткою 0,00655 істотно підвищує динамічну в'язкість тетраліну, тоді як густина, теплопровідність і питома теплоємність у межах експериментальної невизначеності практично не змінюються. Методом динамічного розсіяння світла встановлено тенденцію до збільшення гідродинамічного розміру частинок зі зростанням концентрації C₆₀.

3. Розвинуто уявлення про вплив малих добавок фулерену C₆₀ на калоричні та структурні властивості технічного парафіну. Встановлено зміну різниці ентальпій плавлення та кристалізації, а також параметрів елементарної комірки кристалічної ґратки; показано, що за масової частки C₆₀ 0,000524 різниця ентальпій плавлення і кристалізації практично зникає.

4. За результатами дослідження течії нанофлюїду тетралін/ C₆₀ обґрунтовано можливість застосування рівнянь Пуазейля та Блазіуса для розрахунку гідравлічного опору за умови

використання експериментально визначеної в'язкості нанофлюїду. Встановлено особливості ламінарно-турбулентного переходу та вплив концентрації C_{60} на характеристики переносу імпульсу і теплоти.

5. За результатами чисельного моделювання процесів переносу у плоскому комбінованому фотоелектричному/тепловому колекторі показано, що зміна концентрації C_{60} практично не впливає на загальний ККД колектора, однак дає змогу регулювати розподіл поглинутої сонячної енергії між тепловою та електричною складовими.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків забезпечується комплексним характером дослідження, що поєднує вимірювання оптичних, реологічних, калоричних і структурних характеристик, експериментальне дослідження гідродинаміки та тепловіддачі, а також чисельне моделювання методами обчислювальної гідродинаміки. Для оброблення результатів використано статистичні методи, апроксимацію експериментальних даних і зіставлення з класичними теоретичними залежностями та результатами інших авторів.

Достовірність отриманих результатів підтверджується застосуванням сучасних вимірювальних методів і обладнання, узгодженістю окремих експериментальних результатів із фундаментальними закономірностями гідродинаміки та теплопереносу, аналізом експериментальної невизначеності, а також апробацією результатів на міжнародних наукових конференціях і їх опублікуванням у рецензованих наукових виданнях.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання встановлених закономірностей для цілеспрямованого вибору складу нанофлюїдів на основі C_{60} залежно від умов їх застосування, для оцінювання гідравлічних і теплообмінних характеристик каналів із такими середовищами, а також під час проектування комбінованих фотоелектричних/теплових колекторів із прямим поглинанням сонячного випромінювання. Результати можуть бути використані й в освітньому процесі під час викладання дисциплін із теплофізики, фізики дисперсних систем, тепломасообміну та відновлюваної енергетики.

Таким чином, поставлене в дисертації наукове завдання загалом виконано, а здобувач продемонстрував здатність самостійно планувати дослідження, застосовувати сучасні експериментальні та чисельні методи, інтерпретувати результати і формулювати науково обґрунтовані висновки.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 13 наукових працях, серед яких 2 статті у виданнях, що індексуються у базі Scopus і належать до першого квартиля (Q1), 2 статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б» та 9 публікацій у матеріалах наукових конференцій, 4 з яких індексуються у Scopus. Результати дослідження апробовано на дев'яти міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях. Тематика публікацій і доповідей відповідає основним розділам дисертації та достатньо відображає її ключові наукові результати.

Зауваження та дискусійні положення.

Незважаючи на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи, до її змісту та оформлення є окремі зауваження і дискусійні питання:

1. В роботі були проведені дослідження нанофлюїду на основі C_{60} та технічного парафіну (ТП) різних концентрацій. Показано, що концентрація насичення C_{60} в розчині складає 0,000746 м.ч. при температурі 60-65 °С. Але цю концентрацію чомусь не використовує автор про дослідження впливу концентрації C_{60} на властивості нанофлюїду.
2. З дисертаційної роботи не зрозуміло, чим обумовлений різний набір методів дослідження нанофлюїдів тетраліну/ C_{60} та технічного парафіну / C_{60} .
3. В п. 2.2.2 описано методику калориметра змінної температури з ізотермічною оболонкою, але не описано теоретичні основи розрахунку питомої ізобарної теплоємності.
4. В п. 2.2.5 приведений структурний аналіз зразків фулерен C_{60} / технічний парафін. Описано методику розрахунку параметрів елементарної комірки, але не приведено

дифрактограм для досліджуваних зразків, що не дає можливість оцінити правильність розрахунків.

5. В роботі вказано, що густину нанофлюїду тетралін / фулерен C_{60} визначали з точністю $\pm 5 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, що складає 0,5%. Така похибка не дає можливість стверджувати, що C_{60} впливає на густину бо такий вплив з експерименту складає 0,7%.
6. Визначення питомої ізобарної теплоємності нанофлюїду тетралін / фулерен C_{60} проводились при абсолютному тиску $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, але ж в реальних умовах нанофлюїд буде використовуватись при тиску близькому до атмосферного.
7. Інтервал температур дослідження фізичних властивостей нанофлюїду на основі тетраліну складав $22-57 \text{ }^\circ\text{C}$, але реальні температури застосування в колекторах сонячної енергії $20-150 \text{ }^\circ\text{C}$. Чи можна отримані закономірності впливу концентрації фулерену на властивості нанофлюїду розповсюдити на вищі температури?
8. В роботі отримано розмір елементарної орторомбічної комірки $2,5 \times 13 \times 15 \text{ \AA}$ для технічного парафіну. Відомо, що діаметр молекули парафіну складає приблизно $4,5 \text{ \AA}$. Згідно отриманих результатів виходить, що молекула парафіну не входить цілою в елементарну комірку, а це не притаманне для орторомбічної комірки.
9. У роботі трапляються описки в формулах, є неправильні посилання на формули. Наприклад, в ф. 3.1 діаметр в другій степені, а потрібно в четвертій степені.

Наведені зауваження мають переважно рекомендаційний і дискусійний характер, не знижують наукової цінності виконаного дослідження та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, її наукову новизну й практичну значущість. Висловлені положення можуть бути враховані автором в подальших наукових дослідженнях.

Загальний висновок та оцінка дисертації.

Дисертаційна робота Хлієва Нікити Олександровича на тему «Вплив управляючих параметрів на теплофізичні й оптичні властивості нанофлюїдів на основі фулерену C_{60} та процеси переносу з ними» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому отримано нові науково обґрунтовані результати в галузі фізики дисперсних систем та теплофізики.

За актуальністю, науковою новизною, теоретичним і практичним значенням, обґрунтованістю отриманих результатів, повнотою їх оприлюднення та рівнем виконання дисертаційна робота Хлієва Нікити Олександровича на тему «Вплив управляючих параметрів на теплофізичні й оптичні властивості нанофлюїдів на основі фулерену C_{60} та процеси переносу з ними» **відповідає вимогам** наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та постанові КМ від 12.01.2022 р. № 44 «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (з останніми змінами, внесеними постановами КМ № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р. та № 507 від 03.05.2024 р.), а її автор Хлієв Нікіта Олександрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 - Природничі науки за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри молекулярної фізики
фізичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка



Максим ЛАЗАРЕНКО

