

ДОСЛІДЖЕННЯ ХОЛОДОАГЕНТІВ

УДК 620.97:697.329:532.13+532.14

Дослідження коефіцієнта поглинання, густини та в'язкості розчинів нанофлюїду Dowtherm RP/фулерен C₆₀О. А. Шумський^{1✉}, В. О. Борисов²^{1,2}Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна 112, м. Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ¹aleksei.shumskyi@gmail.comORCID: ¹<https://orcid.org/0009-0008-0783-3896>; ²<https://orcid.org/0000-0002-2678-3774>

У роботі досліджено теплофізичні та оптичні властивості теплоносія Dowtherm RP, модифікованого фулереном C₆₀, з метою оцінки можливості його застосування як теплоносія для середньотемпературних плоских сонячних колекторів. Стабільні розчини з масовою концентрацією фулерену C₆₀ 0,074...0,295 % маси отримували методом розчинення насиченого розчину без ультразвукової диспергації. Згідно з отриманими даними, добавка C₆₀ істотно збільшує значення спектральних коефіцієнтів поглинання у видимій області спектра аж до довжин хвиль ~650 нм. Слабка реакція в ближньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль (~700...800 нм) вказує на відсутність у зразках нанофлюїдів великих агрегатів. Повторні вимірювання підтвердили стабільність у часі отриманих зразків нанотеплоносія. Густина досліджуваних зразків монотонно зменшується із зростанням температури (20...120 °C), тоді як концентраційна залежність густини має немонотонний характер, що узгоджується з конкуренцією структурних ефектів у рідкій фазі та мас-адитивним внеском фулерену C₆₀. Кінематична в'язкість демонструє очікувану значну температурну залежність і задовільно описується розширеною кореляцією Вальтера. У дослідженому діапазоні концентрацій вплив C₆₀ невеликий, що важливо для зменшення енерговитрат на перекачування теплоносія в сонячному колекторі. При підвищенні температури проявляється тенденція до зниження в'язкості нанотеплоносіїв відносно базової рідини. Практична новизна роботи полягає в отриманні масиву експериментальних даних та простих інженерних кореляцій для спектральних коефіцієнтів поглинання, густини та в'язкості нового теплоносія Dowtherm RP/C₆₀ в інтервалі концентрацій, релевантному циркуляційним контурам середньотемпературних сонячних енергетичних систем. Отримані експериментальні дані сприяють отриманню достовірності гідравлічного та оптико-теплого проектування сонячних колекторів з органічними теплоносіями, модифікованими фулереном C₆₀, і демонструють можливість посилення сонячного поглинання світла без типового для багатьох нанорідин збільшення в'язкості.

Ключові слова: Dowtherm RP; Фулерен C₆₀; Нанотеплоносії; Спектральні коефіцієнти поглинання; Густина; Динамічна в'язкість; Концентрація; Сонячні теплові колектори.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3354>

© The Author(s) 2025. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Сучасна енергетика стоїть перед необхідністю радикального підвищення ефективності перетворення відновлюваних джерел енергії. Зокрема, розвиток геліотермальних систем вимагає пошуку

інноваційних рішень для оптимізації процесів теплопередачі. Плоскі сонячні колектори (FPSC) широко використовуються для перетворення сонячного випромінювання в теплову енергію для побутових і промислових потреб завдяки своїй простоті конструкції і високій ефективності перетво-

рення сонячної енергії в теплову. Ефективність таких колекторів залежить від безлічі факторів, включаючи характеристики теплоносія, що робить дослідження його теплофізичних властивостей особливо актуальним для підвищення енергетичної ефективності та зменшення експлуатаційних витрат [1,2].

Високотемпературні органічні теплоносії типу Dowtherm RP застосовуються в системах рідинно-фазового теплоперенесення завдяки термічній стабільності та можливості роботи в широкому температурному діапазоні, що робить їх перспективними для енергетичних і сонячних теплових установок. Однак його власні поглинаючі здатності у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні недостатні для застосування в сонячній енергетиці. Перспективним напрямком модифікації теплоносіїв є застосування нанотехнологій з метою отримання нанофлюїдів (нанотеплоносіїв), які містять наночастинки в базовій рідині. Дослідження показують, що введення наночастинок в базову рідину може змінювати теплопровідність, густину, в'язкість і оптичні характеристики теплоносіїв, що потенційно сприяє інтенсифікації теплообміну і підвищенню ефективності сонячних колекторів [3-5]. Серед вуглецевих наноматеріалів особливий інтерес представляє фулерен C_{60} – молекулярна форма вуглецю з високою структурною симетрією і вираженими електронними та оптичними властивостями.

Дослідження нанорідин на основі фулеренів показують, що додавання наночастинок здатне змінювати теплофізичні властивості базових рідин, перш за все теплопровідність і в'язкість, при цьому ступінь впливу залежить від концентрації частинок, природи розчинника і стійкості отриманих нанотеплоносіїв [9-12]. Крім того, фулерен C_{60} має виражені спектральні особливості поглинання у видимій та ультрафіолетовій областях, що може впливати на оптичні властивості рідин та їх здатність поглинати сонячне випромінювання [6-8].

Незважаючи на активні дослідження нанотеплоносіїв для сонячних колекторів, дані про комплексний вплив фулерену C_{60} на густину, в'язкість і коефіцієнт оптичного поглинання органічних теплоносіїв типу Dowtherm RP залишаються обмеженими. Для практичного застосування в середньотемпературних плоских сонячних колекторах необхідні експериментальні дані, що дозволяють оцінити зміну гідродинамічних характеристик, теплофізичних і оптичних властивостей

таких молекулярних розчинів. Таким чином, дослідження розчинів Dowtherm RP/ C_{60} є актуальним як з точки зору фундаментального вивчення властивостей наномодифікованих органічних рідин, так і з позиції розробки енергоефективних теплоносіїв для сонячних теплових систем. Мета роботи – встановити вплив концентрації фулерену C_{60} на коефіцієнт оптичного поглинання, густину і в'язкість розчинів на основі Dowtherm RP у широкому діапазоні температур.

2. Матеріали та методи створення зразків

Для приготування розчинів були використані наступні матеріали:

- фулерен C_{60} , виробник Suzhou Dade Carbon Nanotechnology Co., Ltd., Китай, CAS# 99685-96-8, вміст основного компонента 99,5 мас. %;
- теплоносії Dowtherm RP (1,2,3,4-Tetrahydro-6-(1-phenylethyl) naphthalene), виробник The Dow Chemical Company, CAS# 6196-98-1, чистота 0,99 кг/кг⁻¹;

При підготовці зразків розчинів фулерену C_{60} в теплоносії Dowtherm RP процедура ультразвукового диспергування була виключена, оскільки в нещодавно опублікованих роботах [9-12] було показано, що цей процес може сприяти утворенню кластерів.

Технологія підготовки зразків нанофлюїдів складалася з декількох етапів. Окрему масу кристалів фулерену C_{60} висушували при температурі 80 °C протягом 4-х годин під вакуумом. Потім фулерен C_{60} розчинявся в певній кількості теплоносія без інтенсивного механічного впливу і витримувався в герметичній колбі (без контакту з повітрям) протягом 10 діб в темному приміщенні. Після періодичного неінтенсивного розмішування компонентів розчинів спостерігалось осадження нерозчинених кристалів C_{60} на дно колби.

Отриманий насичений розчин фулерену C_{60} в теплоносії Dowtherm RP обережно відокремлювали від осаду з нерозчиненими кристалами фулерену C_{60} на дні колби. Залишки розчину фільтрували і зважували з метою коректного визначення концентрації отриманого насиченого розчину. Другий етап технології отримання зразків полягав у розведенні насиченого розчину базовим теплоносієм. Маса компонентів розчинів визначалася з використанням електронних аналітичних ваг AND GR-300 з невизначеністю $\pm 0,0003$ г. Розрахунок концентрації проводився за формулою:

$$w = \frac{m_{NP}}{m_{NP} + m_{BF}} \cdot 100, \quad (1)$$

де w – масова концентрація наночастинок фулерену C_{60} (wt.%); m_{NP} – маса наночастинок фулерену C_{60} (кг); m_{BF} – загальна маса Dowtherm RP після кожного розведення початкового розчину (кг). Масова концентрація (wt.%) отриманих зразків наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 – Концентрації отриманих зразків нанофлюїдів

№	Зразок	Концентрація, wt.%
1	Dowtherm RP / C_{60}	0,295
2	Dowtherm RP / C_{60}	0,212
3	Dowtherm RP / C_{60}	0,138
4	Dowtherm RP / C_{60}	0,074

3. Спектральні коефіцієнти поглинання нанофлюїдів

Дослідження спектральних коефіцієнтів поглинання проведено на спектрофотометрі Ulab 102UV. В якості зразка порівняння в проведених дослідженнях використано чистий зразок теплоносія Dowtherm RP. Термостатування зразків досягалося за рахунок установки в кюветному відділенні спектрофотометра контейнера з термоізолюючим матеріалом (парафін/ C_{60} [13]). Запропонована схема регулювання температури оптичних кювет дозволила проводити термостатування при температурі 25 °C протягом 6 годин. Температура зразків вимірювалася мідь-константовою термопарою, яка була встановлена в кюветі (довжина оптичного шляху 1,055 мм). Вимірювання термо-ЕДС термопари проводилося мультиметром Rigol DM3064. Невизначеність вимірювання температури зразків не перевищувала 0,35 °C. Отримана інформація про залежності спектральних коефіцієнтів поглинання від довжини хвилі світла для зразків Dowtherm RP/ C_{60} різної концентрації наведена на рис. 1.

З наведеного рисунка випливає, що розчини Dowtherm RP/ C_{60} з концентраціями більше 0,138 мас.% мають виражену поглинальну здатність при довжинах хвиль до 650 нм. Спектрограми носять монотонний характер, що свідчить про присутність у Dowtherm RP не тільки молекул фулерену, а й агрегатів фулеренів C_{60} різних розмірів.

Наявність точок екстремуму на залежності спектральних коефіцієнтів поглинання в інтервалі

довжин хвиль від 450 до 650 нм вказує, що у нанофлюїді присутні агрегати (наночастки) різних розмірів. Стійкий у певному інтервалі довжин хвиль (від 450 до 650 нм) екстремум на спектрограмах вказує на збільшення кількості агрегатів цілком певного нанорозміру зі зростанням концентрації фулерену C_{60} . В інтервалі довжин хвиль світла від 700 до 800 нм спектральні коефіцієнти поглинання мають невелике значення. Тому можна стверджувати, що великі агрегати в отриманих зразках Dowtherm RP/ C_{60} відсутні.

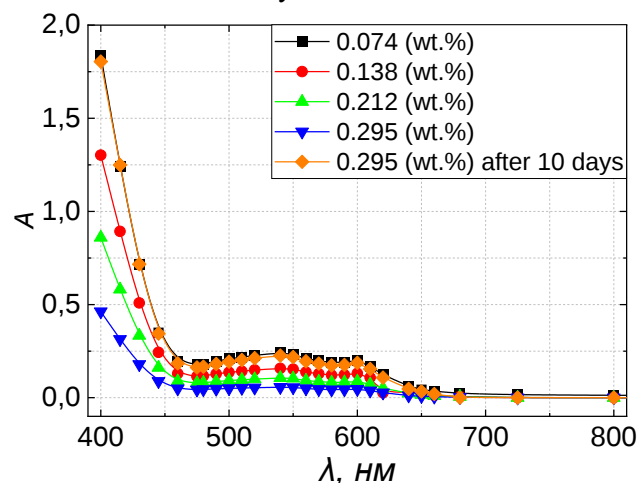


Рисунок 1 – Залежність спектральних коефіцієнтів поглинання від довжини хвилі світла для зразків Dowtherm RP/ C_{60} різного складу при температурі 25 °C.

Повторне вимірювання показника поглинання (для концентрації 0,295% через 10 днів після першого вимірювання) підтвердили стійкість розчинів фулерену C_{60} в Dowtherm RP (величина показника поглинання протягом часу не змінювалася).

4. Дослідження густини нанофлюїдів

Густина розчинів Dowtherm RP/фулерени C_{60} було досліджено пікнометричним методом. Вибір даного методу вимірювання густини обумовлений його високою точністю, яка визначається низьким значенням невизначеності вимірювання маси компонентів на електронних аналітичних вагах AND GR-300 ($\pm 0,0003$ г) та можливістю виконання коректного калібрування об'єму пікнометра. Калібрування пікнометра проводилося з використанням довідкових даних про густину води [14]. Отримані значення об'єму пікнометра в залежності від рівня рідини в ньому були апроксимовані лінійною залежністю (2). Розширена невизначеність проведе-

ного тарування пікнометра становить $0,003 \text{ см}^3$.

$$V'(\Delta h) = a \cdot \Delta h - b \quad (2)$$

де $V'(\Delta h)$ – об'єм рідини у пікнометрі, (см^3); Δh – висота стовпчика рідини в пікнометрі, мм; $a = 0,00300821$ та $b = 2,373699007$ коефіцієнти.

Усі вимірювання густини розчинів Dowtherm RP/C₆₀ були виконані з використанням одного пікнометра, що дозволило значно зменшити система-

тичну складову розширеної невизначеності отриманих експериментальних даних. Крім того, вимірювання густини проводилися багаторазово з метою зменшення випадкової складової розширеної невизначеності експериментальних даних.

Отримані експериментальні дані про густину нанофлюїдів Dowtherm RP/C₆₀ наведено в табл. 2. та апроксимовані рівнянням:

$$\rho(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c. \quad (3)$$

Таблиця 2 – Експериментальні дані густини нанофлюїдів Dowtherm RP/C₆₀ при різних концентраціях

0 wt, %		0,074 wt, %		0,138 wt, %		0,212 wt, %		0,295 wt, %	
T, К	ρ , г·см ⁻³	T, К	ρ , г·см ⁻³	T, К	ρ , г·см ⁻³	T, К	ρ , г·см ⁻³	T, К	ρ , г·см ⁻³
293,17	1,0387	293,17	1,0308	293,20	1,0308	293,21	1,0388	293,19	1,0416
313,60	1,0246	313,20	1,0172	313,17	1,0169	313,20	1,0253	333,18	1,0138
333,19	1,0113	323,17	1,0104	323,10	1,0104	323,21	1,0185	353,18	1,0002
353,16	0,9978	343,18	0,9971	343,19	0,9969	343,17	1,0050	373,18	0,9860
373,16	0,9838	373,16	0,9763	373,17	0,9764	373,21	0,9844	393,15	0,9720
393,18	0,9699	393,15	0,9625	393,20	0,9627	393,17	0,9707		

У таблиці 3 наведені коефіцієнти рівняння кожної з концентрацій:

Таблиця 3 – Коефіцієнти рівняння (3)

wt, %	a	b	c
0	$-9,221 \cdot 10^{-8}$	$-6,868 \cdot 10^{-4}$	1,004521
0,074	$-1,259 \cdot 10^{-7}$	$-6,825 \cdot 10^{-4}$	0,996941
0,138	$-1,690 \cdot 10^{-8}$	$-6,794 \cdot 10^{-4}$	0,996787
0,212	$-8,170 \cdot 10^{-8}$	$-6,813 \cdot 10^{-4}$	1,004974
0,295	$-8,336 \cdot 10^{-8}$	$-6,959 \cdot 10^{-4}$	1,007015

На рис. 2, 3 показані температурна та концентраційна залежності густини розчинів Dowtherm RP/C₆₀. Відхилення отриманих експериментальних даних від розрахованих за рівнянням (3) представлені на рис.4.

Як випливає з інформації, наведеної на рис. 2, густина базового теплоносія Dowtherm RP і нанофлюїду Dowtherm RP/C₆₀ в інтервалі 20...120 °С монотонно зменшується із зростанням температури. Набір кривих для досліджених масових концентрацій ($w = 0; 0,074; 0,138; 0,212; 0,295$ мас. %) утворює «сімейство» залежностей з близькими нахилами, тобто додавання фуллерену C₆₀ у розглянутому діапазоні концентрацій переважно призводить до зсуву значень густини, але не викликає вираженої зміни температурного коефіцієнта $d\rho/dT$ в межах похибки експерименту.

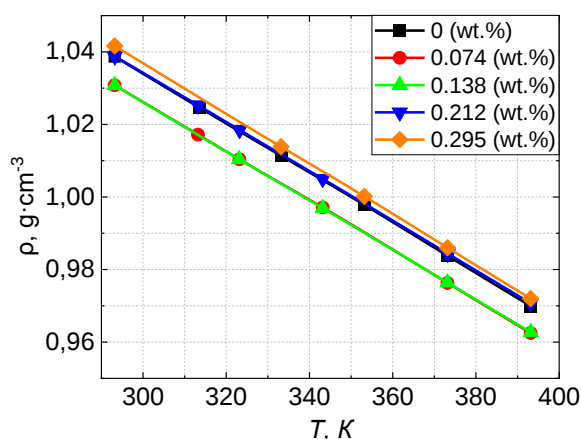


Рисунок 2 – Температурна залежність густини розчинів Dowtherm RP/C₆₀

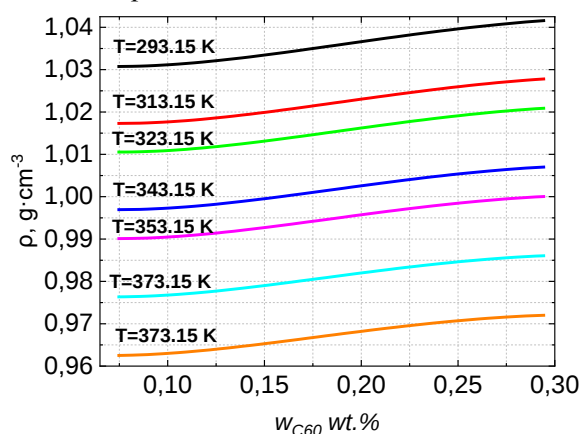


Рисунок 3 – Концентраційна залежність густини розчинів Dowtherm RP/C₆₀

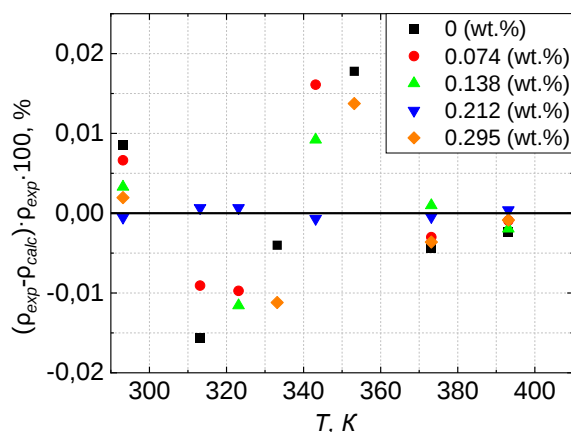


Рисунок 4 – Відхилення експериментальних даних від даних, розрахованих за формулою (3) для Dowtherm RP/C₆₀.

Якісно аналогічний тип температурних залежностей (сімейство майже рівновіддалених ліній) відзначений для молекулярних розчинів фулеренів C₆₀ в ароматичних розчинниках і інтерпретується як прояв термодинамічно подібної поведінки розчину і базової рідини [15].

На рис. 3 представлена концентраційна залежність густини $\rho(w)$ при декількох фіксованих температурах. У діапазоні 0,074...0,295 мас.% спостерігається немонотонна поведінка: при переході від $w = 0,074$ до 0,138 мас.% густина злегка зменшується, тоді як при подальшому збільшенні концентрації (починаючи з $w \geq 0,212$ мас.%) густина зростає при всіх досліджених температурах.

Важливо підкреслити, що величина локального зменшення густини між 0,074 і 0,138 мас.% за характером графіків є порівняно невеликою. Тому коректна інтерпретація вимагає, щоб даний ефект перевищував сумарну невизначеність (помилки приготування концентрації і невизначеності пікнометричного визначення густини).

Немонотонність $\rho(w)$ для систем «фулерен-ароматична рідина» в літературі зазвичай розглядають як результат конкуренції двох внесків:

1. Структурного внеску (зміна мікроструктури/упаковки молекул розчинника в присутності C₆₀), який може призводити до збільшення ефективного питомого об'єму розчину і, отже, до зниження густини.
2. Масо-адитивного внеску (умовно «класичний» вплив добавки більш щільного компонента), при якому зростання концентрації повинно збільшувати густина.

Для ароматичних розчинників експериментально показано, що при досить малих концен-

траціях C₆₀ густина розчину може бути нижчою за густина чистого розчинника (незважаючи на високу густина твердого C₆₀), а потім при збільшенні концентрації спостерігається перехід до зростання густини і формування мінімуму $\rho(w)$ [15,16]. Для пояснення такої «парадоксальної» поведінки запропоновано моделі, що пов'язують ефект з перебудовою рідкої фази і формуванням областей вільного об'єму (зон зниженої/умовно «нульової» густини) навколо фулерену внаслідок неефективного упакування і специфічної організації молекул розчинника в ближній оболонці [17]. В рамках концепції немонотонного впливу фулеренів на властивості конденсованих середовищ допускається існування концентраційних інтервалів, в яких домінують різні механізми (структурний/масо-адитивний) [18].

Стосовно нанофлюїду Dowtherm RP/C₆₀ (на органічній, ароматичній основі) помітне зниження щільності між 0,074...0,138 мас.% можна трактувати як прояв можливого структурного внеску, який в цьому діапазоні компенсує (або навіть перевершує) прямий масо-адитивний внесок від добавки C₆₀. При більш високих концентраціях ($\geq 0,212$ мас.%) ймовірно настає режим, де структурний внесок насичується (ефективний «додатковий вільний об'єм» на одиницю доданого C₆₀ зменшується), і починає домінувати масо-адитивний внесок, що призводить до зростання густини.

При цьому слід підкреслити чітке формулювання: структурне пояснення для Dowtherm RP/C₆₀ є робочою гіпотезою, заснованою на аналогії з системами C₆₀/ароматичні розчинники і на загальних уявленнях про поведінку фулеренів в молекулярних рідинах [15-20]. Для остаточного підтвердження потрібні додаткові вимірювання і незалежні структурно-чутливі методи.

У роботі [15] по системі C₆₀/о-ксилол показано, що аномальна зона зниження густини відноситься до дуже малих концентрацій (порядку до ~0,05 мас.% з мінімумом близько цієї області), а істотні зміни термодинамічних параметрів/флуктуаційних характеристик зосереджені в діапазоні 0...0,2 мас.%. Для розчинів C₆₀ у бензолі, толуолі та p-ксилолі також виявлено концентраційні залежності з мінімумом, причому положення мінімуму залежить від розчинника [16].

Оскільки в даному наборі даних мінімальна концентрація становить 0,074 мас.%, область $w < 0,074$ мас.% не розглядалася. Тому спостережуване зниження густини між 0,074 і 0,138 мас.%

може бути сумісним з «низькоконцентраційною аномальною зоною», але положення і глибина мінімуму для Dowtherm RP за даними рис. 2 не локалізовані і повинні визначатися розширенням обсягу досліджень нанофлюїдів з невеликою концентрацією. Це завдання виходить за межі цілей проведення дослідження густини нанотеплоносіїв для сонячної енергетики.

5. Дослідження кінематичної в'язкості

Експериментальні дослідження кінематичної в'язкості розчинів Dowtherm RP/C₆₀ виконані капілярним методом. Цей експериментальний метод широко використовується для дослідження в'язкості нанофлюїдів [21-23]. Основним елементом установки був капілярний віскозиметр Уббелюде. Віскозиметр термостатували в скляній посудині Дьюара. Коливання температури в термостаті не перевищували 0,05 К. Температура під час експериментальних досліджень вимірювалася термометром опору Pt – 100 (WIKА, TR40).

Значення кінематичної в'язкості визначали відносним методом за формулою:

$$\nu = \frac{g}{9.807} \cdot \tau \cdot K, \quad (4)$$

де ν – кінематична в'язкість, мм²/с; g – прискорення вільного падіння на географічній широті

місця проведення дослідження (у нашому випадку 9,8075 м/с); τ – час витікання рідини, с; K – постійна віскозиметра, мм²/с.

Для проведення експериментальних досліджень в'язкості в широкому інтервалі температур, в проведених експериментах використовувалося два віскозиметри з діаметром капіляра $d_1 = 1,12$ мм², $d_2 = 0,62$ мм² та постійною віскозиметра $K_1 = 0,09502$ мм²/с, $K_2 = 0,01094$ мм²/с. Усі вимірювання в'язкості розчинів Dowtherm RP/C₆₀ проводилися багаторазово, щоб зменшити випадкову складову розширеної невизначеності експериментальних даних. Отримані експериментальні дані про кінематичну в'язкість нанофлюїдів Dowtherm RP/C₆₀ наведені в табл. 4 та апроксимовані модифікованим рівнянням Вальтера:

$$\lg(\lg \nu + c) = A(w) + B(w) \cdot \lg T + D(w) \cdot \lg(T)^2, \quad (5)$$

де, ν – кінематична в'язкість мм²·с; T – температура К; c – поправочний коефіцієнт, що дорівнює 1,3492.

Концентраційні залежності коефіцієнтів рівняння Вальтера (5) апроксимовані рівняннями:

$$A(w), B(w), C(w) = a \cdot (w)^2 + b \cdot (w) + c. \quad (6)$$

Таблиця 4 – Експериментальні дані кінематичної в'язкості нанофлюїдів Dowtherm RP/C₆₀ при різних концентраціях

0 wt, %		0.074 wt, %		0.138 wt, %		0.212 wt, %		0.295 wt, %	
T, К	ν , мм ² ·с	T, К	ν , мм ² ·с	T, К	ν , мм ² ·с	T, К	ν , мм ² ·с	T, К	ν , мм ² ·с
293,18	41,1346	293,17	41,4922	293,20	40,3091	293,21	40,2749	293,17	41,4013
313,07	14,1902	303,24	22,7212	303,17	22,4114	303,21	22,5875	313,16	14,2174
323,40	9,4777	313,20	14,2197	313,19	14,1180	313,22	14,0867	323,21	9,6340
333,23	6,8636	323,17	9,6804	323,19	9,4961	323,21	9,5068	343,17	5,2291
343,19	5,4649	343,18	5,1989	343,20	5,4789	343,19	5,2529	373,15	2,7578
373,15	2,9138	373,16	2,8300	373,17	2,9362	373,15	2,7721	393,15	2,0304
393,15	2,1735	393,15	2,0078	393,17	2,1340	393,15	2,0064		

У таблиці 5 наведено коефіцієнти рівняння (6).

Таблиця 5 – Коефіцієнти рівняння (6)

	$A(w)$	$B(w)$	$C(w)$
a	69.60	-51.32	9.40
b	-1456.56	1184.65	-240.88
c	-17516.70	14221.60	-2886.38

На рис. 5 представлена температурна залежність кінематичної в'язкості розчинів Dowtherm RP/C₆₀ при декількох масових концентраціях добавки (до ~0,3 мас.%). У всьому дослідженому діапазоні температур спостерігається типове для органічних теплоносіїв зниження в'язкості при нагріванні. При цьому експериментальні точки для різних концентрацій C₆₀ практично збігаються між

собою, а апроксимуюча крива описує загальний тренд без помітного систематичного відхилення за концентраціями. Такий вид даних вказує, що вплив добавки C_{60} на абсолютне значення $\nu(T)$ у вибраному діапазоні концентрацій невеликий.

Температурні залежності в'язкості в логарифмічних координатах (рис. 6) підтверджують, що $\nu(T)$ для всіх концентрацій зберігають загальну функціональну форму. Таким чином, домішки C_{60} не змінюють характер температурної залежності в'язкості.

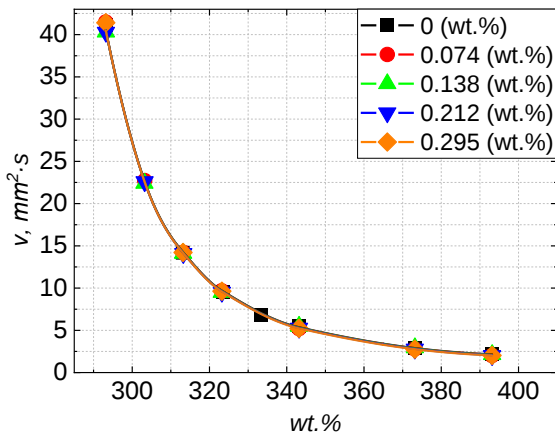


Рисунок 5 – Температурні залежності кінематичної в'язкості розчинів Dowtherm RP/ C_{60} при різних концентраціях

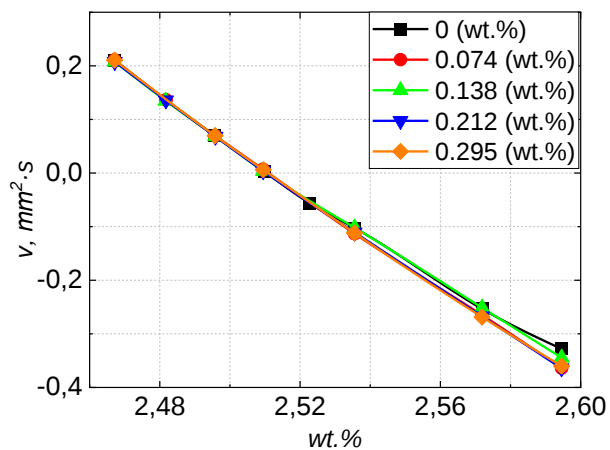


Рисунок 6 – Температурні залежності кінематичної в'язкості розчинів Dowtherm RP/ C_{60} при різних концентраціях у логарифмічній шкалі

З інформації, наведеної на рис. 7, випливає, що при додаванні домішок фулерена C_{60} відносна різниця між значеннями в'язкості теплоносія і нанотеплоносія стає від'ємною. Таким чином, домішки фулерена C_{60} знижують кінематичну в'язкість базового теплоносія. При цьому видно, що ефект посилюється зі збільшенням температури. Чим вища температура, тим помітніше зниження в'язкості

при збільшенні концентрації C_{60} у теплоносії.

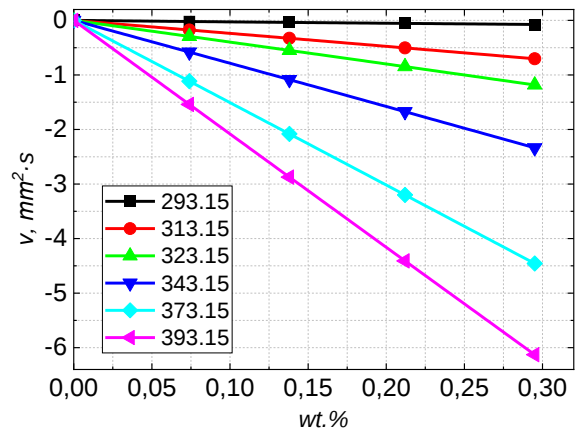


Рисунок 7 – Концентраційна залежність абсолютної різниці кінематичної в'язкості розчинів Dowtherm RP/ C_{60} від чистого теплоносія

Відхилення отриманих експериментальних даних від розрахованих за рівнянням (5) представлені на рисунку 8.

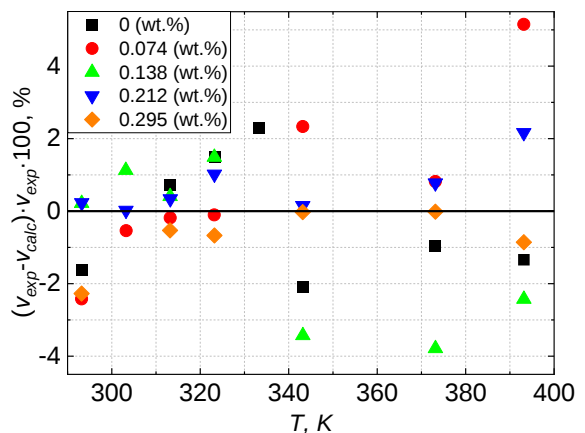


Рисунок 8 – Відхилення експериментальних даних щодо щільності розчинів Dowtherm RP/ C_{60} від розрахованих за рівнянням (5)

Спостережуване зменшення в'язкості для розчинів Dowtherm RP/ C_{60} – результат, який добре ілюструє загальну для фулеренових домішок закономірність: знак і величина впливу фулерену C_{60} на реологію розглянутих розчинів залежать від природи розчинника і агрегатного стану наночастинок.

У роботах [8,15] з розчинами о-ксилол/ C_{60} повідомляється про помітний вплив домішок C_{60} на властивості базової рідини. Концентраційна залежність може бути складною і не завжди монотонною (для різних властивостей і інтервалів концентрацій). На рівні фізичної інтерпретації отриманих даних ця гіпотеза узгоджується з тим, що в

ароматичних середовищах фулерен C_{60} може переходити від «молекулярно розчиненого» стану до формування агрегатів. У цьому випадку в'язкість може змінюватися за рахунок збільшення ефективного гідродинамічного об'єму дисперсної складової і зміни міжмолекулярних взаємодій.

Для системи тетралін/ C_{60} автори [7] вказують на зміни в'язкості та інших теплофізичних властивостей базової рідини при додаванні домішок C_{60} .

На рівні додатків до сонячних систем слід враховувати, що в роботі з теплового менеджменту PV/T-колекторів при використанні теплоносія тетралін/ C_{60} підкреслюється необхідність враховувати компроміс «поліпшення функціональних властивостей або можливе збільшення гідравлічних втрат». Тому в'язкість є одним з ключових обмежувачів при виборі нанодомішок до теплоносіїв [5].

Для деяких органічних розчинників при низьких концентраціях C_{60} спостерігаються випадки, коли в'язкість змінюється незначно і не демонструє «класичної» картини різкого зростання, очікуваної для суспензій твердих наночастинок. Наприклад, у дослідженні [24] розчинів фулерена C_{60} відзначається відсутність вираженого внеску і в цілому нерадикальний характер реологічних змін у рідинах нижче параметрів насичення. Це принципово узгоджується з тим висновком, що молекулярні розчини фулеренів і наносуспензії (в колоїдному сенсі) можуть давати різні реологічні характеристики розчинів при близьких значеннях концентрації нанодомішок.

У роботах по системах, схильних до агрегації C_{60} (наприклад, N-метил-2-піролідон), показано, що з часом формуються стійкі агрегати, і цей процес супроводжується зміною в'язкості, причому характер зміни залежить від концентрації та історії зразка (фактора «старіння») [25]. Це важливий аргумент на користь того, що неоднозначність впливу фулерену C_{60} на в'язкість часто пов'язана не тільки з хімічною природою основи, але і з тим, в якому стані знаходиться C_{60} в рідині: «молекули/комплекси» або «кластери/агрегати»..

Систематично ця неоднозначність описана в огляді Мчедлова Петросяна [19], де підкреслюється, що фулерени в рідких середовищах часто утворюють комплекси і кластери, а спостережувані ефекти чутливі до розчинника, концентрації, температури і кінетики формування агрегатів. Доповнюють картину і дані щодо розчинності C_{60} в органічних розчинниках, які показують дуже широкий діапазон розчинності і тим самим різну

«відстань до параметрів насичення» для різних базових рідин [26,27].

Для багатьох нанофлюїдів характерне збільшення в'язкості і, як наслідок, зростання витрат на перекачування. Це один з найбільш стійких висновків узагальнюючих оглядів [28,29]. Тому факт того, що для Dowtherm RP/ C_{60} в проведеному експерименті проявляється тенденція до зниження в'язкості, виглядає особливо суттєвим. Цей висновок потенційно знімає типовий «бар'єр впровадження» нанодомішок в циркуляційних сонячних контурах.

6. Висновки

Отримані результати показують, що домішки фулерена C_{60} в Dowtherm RP здатні покращувати оптичні характеристики теплоносія при збереженні (або поліпшенні) ключових гідравлічних параметрів, що актуально для середньотемпературних плоских сонячних колекторів, де ефективність визначається одночасно поглинанням випромінювання і витратами на перекачування.

Введення домішок фулерена C_{60} призводить до вираженого зростання поглинання у видимій області спектра (до 650 нм), що потенційно підвищує частку поглиненої сонячної енергії в діапазоні максимальної інтенсивності сонячного випромінювання. При цьому в ближньому інфрачервоному діапазоні (~700...800 нм) зміни незначні, що узгоджується з відсутністю виражених оптичних втрат, пов'язаних з укрупненням частинок, і підтримує можливість практичного застосування в циркуляційних контурах.

Температурна залежність щільності зберігає монотонний характер у всьому дослідженому діапазоні температур, а концентраційна залежність густини $\rho(w)$ виявляє слабку немонотонність. Це вказує на конкуренцію структурних ефектів розчину і маса-адитивного внеску присадки і важливо для поліпшення якості розрахунків масової витрати і теплоємнісних балансів в колекторних системах сонячних енергетичних установок.

Отримані в експериментальних дослідженнях значення в'язкості досліджених зразків нанотеплоносіїв демонструють незначне зниження з ростом температури. При підвищенні температури спостерігається тенденція до зменшення в'язкості відносно базової рідини. Практично цей ефект означає зниження витрат енергії на перекачування теплоносія по контуру сонячного при одночасному

посиленні оптичного поглинання.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає у встановленні закономірностей у зміні комплексу властивостей «поглинання світла – густина – в'язкість» для нанотеплоносіїв Dowtherm RP/C₆₀ у діапазоні концентрацій, релевантному сонячним колекторам, що створює основу для інженерної оптимізації теплоносія як оптико-теплого середовища.

Дослідження виконано в межах реалізації проекту «Нові термоакумулятивні наноматеріали для когенераційних сонячних енергетичних установок (розробка технології отримання, теплофізичні властивості та теплообмін)», за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України.

Особистий внесок авторів CRediT

Шумський О.А.: проведення експерименту, математична обробка результатів, аналіз та узагальнення даних. **Борисов В.О.:** інформаційний пошук, участь в проведенні розрахунків.

Література

1. Saad A. A., Khaleel M. H., Abdulwahaab A. M., Kaska S. E. Flat-Plate Solar Collectors: Development Methods and Challenges // *Energy Systems Research*. – 2025. – Vol. 8(3). – P. 97-107. <https://doi.org/10.25729/esr.2025.03.0009>.
2. Xiao S., Zhang Y., Xia K., Long J. Influence of operating conditions on solar energy utilization efficiency of flat plate solar collector // *Renewables: Wind, Water, and Solar*. – 2022. – Vol. 9(1). – A. 2. <https://doi.org/10.1186/s40807-022-00070-9>.
3. García-Rincón M. A., Flores-Prieto J. J. Nanofluids stability in flat-plate solar collectors: A review // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2024. – Vol. 271. – A. 112832. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.112832>.
4. Cruz J. M., Crepaldi S. A., Gutiérrez-Urueta G. L., Rubio J. D. J., Zacarías A., Jiménez C., Balcazar R. Performance Assessment of Flat Plate Solar Collector Using Simple and Hybrid Carbon Nanofluids at Low Thermal Capacity // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14(19). – A. 8732. <https://doi.org/10.3390/app14198732>.
5. Lamosa R. A., Motovoy I., Khliyev 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 Conversion and Management*. – 2021. – Vol. 248. – A. 114799. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114799>.
6. Желєзний В. П., Борисов В. О., Квасницький Б. А., Шумський О. А., Івченко Д. О. Вплив домішок фулерена C₆₀ на спектральні коефіцієнти поглинання світла в технічних рідинах // *Фізика аеродисперсних систем*. – 2024. – № (62). – С. 48-56. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2024.62.318548>.
7. Motovoy I. V., Zhelezny V. P., Khliyeva O. Y., Melnik Y. Y., Diachenko I. A., Dmitriev Y. D. Density, specific heat capacity and viscosity of fullerene C₆₀ solutions in tetralin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1683, No. 3. – A. 032027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/3/032027>.
8. Zhelezny V. P., Khanchych K. Y., Motovoy I. V., Nikulina A. S. Viscous behaviour of o-xylene/fullerene C₆₀ solutions // *Journal of Molecular Liquids*. – 2021. – Vol. 328. – A. 115416. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115416>.
9. Mchedlov-Petrosyan N. O. Fullerenes in molecular liquids. Solutions in “good” solvents: Another view // *Journal of Molecular Liquids*. – 2011. – Vol. 161(1). – P. 1-12. <http://doi.org/10.1016/j.molliq.2011.04.001>.
10. Mchedlov-Petrosyan N. O., Marfunin M. O. Formation, stability, and coagulation of fullerene organosols: C₇₀ in acetonitrile-toluene solutions and related systems // *Langmuir*. – 2021. – Vol. 37(23). – P. 7156-7166. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00722>.
11. Mchedlov-Petrosyan N. O., Marfunin M. O., Tikhonov V. A., Shekhovtsov S. V. Unexpected colloidal stability of fullerenes in dimethyl sulfoxide and related systems // *Langmuir*. – 2022. – Vol. 38(32). – P. 10000-10009. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c01408>.
12. Makhmanov U., Ismailova O., Kokhkharov A., Zakhidov E., Bakhramov S. Features of self-aggregation of C₆₀ molecules in toluene prepared by different methods // *Physics Letters A*. – 2016. – Vol. 380(24). – P. 2081-2084. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.04.030>.
13. Zhelezny V., Ivchenko D., Hlek Y., Khliyeva O., Zajdel P., Shestopalov K., Grosu Y. Effect of fullerene C₆₀ on phase transition enthalpy of paraffin wax: Calorimetry and structural analysis // *Journal of Energy Storage*. – 2023. – Vol. 72. – A. 108713. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108713>.
14. Lemmon E. W., Huber M. L., McLinden M. O.

NIST standard reference database 23. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties, REFPROP, version, 10. – 2010.

15. **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 // *Journal of Molecular Liquids*. – 2021. – Vol. 338. – A. 116629. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116629>.

16. **Ginzburg B. M., Tuichiev S., Tabarov S. K.** Concentration-dependent variations in the density of C₆₀ fullerene solutions in aromatic solvents // *Technical Physics Letters*. – 2007. – Vol. 33(8). – P. 639-640. <https://doi.org/10.1134/S1063785007080044>.

17. **Ginzburg B. M., Tuichiev S., Tabarov S. H.** Formation of zero density regions during the dissolving of C₆₀ and C₇₀ // *Journal of Macromolecular Science, Part B*. – 2013. – Vol. 52(6), 773-787. <https://doi.org/10.1080/00222348.2012.721654>.

18. **Ginzburg B. M., Tuichiev S., Rashidov D., Sodikov F. H., Tabarov S. H., Shepelevskii A. A.** Step-Wise Concentration Influence of Fullerenes C₆₀ and C₇₀ on the Various Parameters of Condensed Systems: Part 1: The Concept of Step-Wise Behavior and its Manifestation in Fullerene Solutions // *Journal of Macromolecular Science, Part B*. – 2015. – Vol. 54(5). – P. 533-543. <https://doi.org/10.1080/00222348.2015.1010635>.

19. **Mchedlov-Petrosyan N. O.** Fullerenes in liquid media: an unsettling intrusion into the solution chemistry // *Chemical reviews*. – 2013. – Vol. 113(7). – P. 5149-5193. <https://doi.org/10.1021/cr3005026>

20. **Bezmel'nitsyn V. N., Eletskii A. V.** Fullerenes in solutions // *Physics-uspekhi*. – 1998. – Vol. 41(11). – A. 1091. <https://doi.org/10.1070/PU1998v041n11ABEH000502>

21. **Michaelides E. E.** *Nanofluidics*. Cham: Springer International Publishing. – 2014. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-05621-0>.

22. **Gupta M., Singh V., Kumar R., Said Z. A**

review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 74. – P. 638-670. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.073>

23. **Angayarkanni S. A., Philip J.** Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments // *Advances in colloid and interface science*. – 2015. – Vol. 225. – P. 146-176. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.08.014>

24. **Lozano K., Gaspar-Rosas A., Barrera E. V.** Rheological examination of C₆₀ in low density solutions // *Carbon*. – 2002. – Vol. 40(3). – P. 271-276. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00093-8](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00093-8)

25. **Baltog I., Mihut L., Baibarac M., Preda N., Velula T., Lefrant S.** Surface-enhanced Raman scattering, photoluminescence and viscosity studies on C₆₀ aggregates in N-methyl-2-pyrrolidinone // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. – 2005. – Vol. 7(4). – P. 2165-2172.

26. **Ruoff R. S., Tse D. S., Malhotra R., Lorents D. C.** Solubility of fullerene (C₆₀) in a variety of solvents // *The Journal of Physical Chemistry*. – 1993. – Vol. 97(13). – P. 3379-3383. <https://doi.org/10.1021/j100115a049>

27. **Semenov K. N., Charykov N. A., Keskinov V. A., Piartman A. K., Blokhin A. A., Kopyrin A. A.** Solubility of light fullerenes in organic solvents // *Journal of Chemical & Engineering Data*. – 2010. – Vol. 55(1). – P. 13-36. <https://doi.org/10.1021/jc900296s>

28. **Murshed S. S., Estellé P.** A state of the art review on viscosity of nanofluids // *Renewable and sustainable energy reviews*. – 2017. – Vol. 76, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.113>

29. **Kasaeian A., Eshghi A. T., Sameti M.** A review on the applications of nanofluids in solar energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 43. – P. 584-598. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.020>.

Отримана в редакції 16.11.2025, прийнята до друку 28.11.2025

Research of absorption coefficient, density, and viscosity of Dowtherm RP/fullerene C₆₀ nanofluid solutions

Oleksii Shumskiy^{1✉}, Volodymyr Borysov²

¹⁻²Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹aleksei.shumskiy@gmail.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0009-0008-0783-3896>; ²<https://orcid.org/0000-0002-2678-3774>

This paper investigates the thermophysical and optical properties of Dowtherm RP heat transfer fluid

modified with fullerene C_{60} in order to evaluate its potential use as a heat transfer fluid for medium-temperature flat-plate solar collectors. Stable solutions with a mass concentration of fullerene C_{60} 0.074...0.295 wt.% were obtained by dissolving a saturated solution without ultrasonic dispersion. According to the data obtained, the addition of C_{60} significantly increases the values of spectral absorption coefficients in the visible region of the spectrum up to wavelengths of ~ 650 nm. A weak reaction in the near-infrared wavelength range (~ 700 – 800 nm) indicates the absence of large aggregates in the nanofluid samples. Repeated measurements confirmed the stability of the obtained nanofluid samples over time. The density of the samples studied decreases monotonically with increasing temperature (20 ... 120 °C), while the concentration dependence of the density is non-monotonic, which is consistent with the competition of structural effects in the liquid phase and the mass-additive contribution of fullerene C_{60} . The kinematic viscosity shows the expected significant temperature dependence and is satisfactorily described by the extended Walter correlation. In the tested concentration range, the influence of C_{60} is small, which is important for reducing the energy costs of pumping the heat transfer fluid in a solar collector. With increasing temperature, there is a tendency for the viscosity of nanofluid to decrease relative to the base fluid. The practical relevance of the work lies in obtaining an array of experimental data and simple engineering correlations for the spectral absorption coefficients, density, and viscosity of the new Dowtherm RP/ C_{60} heat transfer fluid in the concentration range relevant to the circulation loops of medium temperature solar energy systems. The obtained experimental data promote the reliability of hydraulic and optical-thermal design of solar collectors with organic heat transfer fluids modified with fullerene C_{60} and demonstrate the possibility of enhancing solar light absorption without the increase in viscosity typical for many nanoliquids.

Keywords: Dowtherm RP; Fullerene C_{60} ; Thermal nanofluid; Spectral absorption coefficients; Density; Dynamic viscosity; Concentration; Solar thermal collectors.

References

1. Saad, A. A., Khaleel, M. H., Abdulwahaab, A. M., Kaska, S. E. (2025). Flat-Plate Solar Collectors: Development Methods and Challenges. *Energy Systems Research*, 8(3), 97-107.
2. Xiao, S., Zhang, Y., Xia, K., Long, J. (2022). Influence of operating conditions on solar energy utilization efficiency of flat plate solar collector. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 9(1), 2.
3. García-Rincón, M. A., Flores-Prieto, J. J. (2024). Nanofluids stability in flat-plate solar collectors: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 271, 112832.
4. Cruz, J. M., Crepaldi, S. A., Gutiérrez-Urueta, G. L., Rubio, J. D. J., Zacarías, A., Jiménez, C., Balcazar, R. (2024). Performance Assessment of Flat Plate Solar Collector Using Simple and Hybrid Carbon Nanofluids at Low Thermal Capacity. *Applied Sciences*, 14(19), 8732.
5. Lamosa, R. A., Motovoy, I., Khliiev, N., Nikulin, A., Khliyeva, O., Moita, A. S., del Barrio Elena, P. (2021). Tetralin+ fullerene C_{60} solutions for thermal management of flat-plate photovoltaic/thermal collector. *Energy Conversion and Management*, 248, 114799.
6. Zhelezny, V. P., Borisov, V. O., Kvasnitsky, B. A., Shumsky, O. A., Ivchenko, D. O. (2024). The influence of C_{60} fullerene impurities on the spectral light absorption coefficients in technical fluids. *Physics of Aerodispersed Systems*, (62), 48-56.
7. Motovoy, I. V., Zhelezny, V. P., Khliyeva, O. Y., Melnik, Y. Y., Diachenko, I. A., Dmitriev, Y. D. (2020). Density, specific heat capacity and viscosity of fullerene C_{60} solutions in tetralin. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683, 3, 032027.
8. Zhelezny, V. P., Khanchych, K. Y., Motovoy, I. V., Nikulina, A. S. (2021). Viscous behaviour of o-xylene/fullerene C_{60} solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 328, 115416.
9. Mchedlov-Petrosyan, N. O. (2011). Fullerenes in molecular liquids. Solutions in “good” solvents: Another view. *Journal of Molecular Liquids*, 161(1), 1-12.
10. Mchedlov-Petrosyan, N. O., Marfunin, M. O. (2021). Formation, stability, and coagulation of fullerene organosols: C_{70} in acetonitrile–toluene solutions and related systems. *Langmuir*, 37(23), 7156-7166.
11. Mchedlov-Petrosyan, N. O., Marfunin, M. O., Tikhonov, V. A., Shekhovtsov, S. V. (2022). Unexpected colloidal stability of fullerenes in dimethyl sulfoxide and related systems. *Langmuir*, 38(32), 10000-10009.
12. Makhmanov, U., Ismailova, O., Kokhkharov, A., Zakhidov, E., Bakhramov, S. (2016). Features of self-aggregation of C_{60} molecules in toluene prepared

by different methods. *Physics Letters A*, 380(24), 2081-2084.

13. Zhelezny, V., Ivchenko, D., Hlek, Y., Khliyeva, O., Zajdel, P., Shestopalov, K., Grosu, Y. (2023). Effect of fullerene C₆₀ on phase transition enthalpy of paraffin wax: Calorimetry and structural analysis. *Journal of Energy Storage*, 72, 108713.

14. Lemmon, E. W., Huber, M. L., McLinden, M. O. (2010). NIST standard reference database 23. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties. *REFPROP*, version, 10.

15. Zhelezny, V. P., Khanchych, K. Y., Motovoy, I. V., Nikulina, A. S. (2021). On the nonmonotonous behavior of the thermal properties of fullerene C₆₀/o-xylene solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 338, 116629.

16. Ginzburg, B. M., Tuichiev, S., Tabarov, S. K. (2007). Concentration-dependent variations in the density of C₆₀ fullerene solutions in aromatic solvents. *Technical Physics Letters*, 33(8), 639-640.

17. Ginzburg, B. M., Tuichiev, S., Tabarov, S. H. (2013). Formation of zero density regions during the dissolving of C₆₀ and C₇₀. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 52(6), 773-787.

18. Ginzburg, B. M., Tuichiev, S., Rashidov, D., Sodikov, F. H., Tabarov, S. H., Shepelevskii, A. A. (2015). Step-Wise Concentration Influence of Fullerenes C₆₀ and C₇₀ on the Various Parameters of Condensed Systems: Part 1: The Concept of Step-Wise Behavior and its Manifestation in Fullerene Solutions. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 54(5), 533-543.

19. Mchedlov-Petrosyan, N. O. (2013). Fullerenes in liquid media: an unsettling intrusion into the solution chemistry. *Chemical reviews*, 113(7), 5149-5193.

20. Bezmel'nitsyn, V. N., & Eletsii, A. V. (1998). Fullerenes in solutions. *Physics-uspekhi*, 41(11), 1091.

21. Michaelides, E. E. (2014). Nanofluidics. *Cham: Springer International Publishing*.

22. Gupta, M., Singh, V., Kumar, R., Said, Z. (2017). A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 638-670.

23. Angayarkanni, S. A., Philip, J. (2015). Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. *Advances in colloid and interface science*, 225, 146-176.

24. Lozano, K., Gaspar-Rosas, A., Barrera, E. V. (2002). Rheological examination of C₆₀ in low density solutions. *Carbon*, 40(3), 271-276.

25. Baltog, I., Mihut, L., Baibarac, M., Preda, N., Velula, T., Lefrant, S. (2005). Surface-enhanced Raman scattering, photoluminescence and viscosity studies on C₆₀ aggregates in N-methyl-2-pyrrolidinone. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 7(4), 2165-2172.

26. Ruoff, R. S., Tse, D. S., Malhotra, R., Lorents, D. C. (1993). Solubility of fullerene (C₆₀) in a variety of solvents. *The Journal of Physical Chemistry*, 97(13), 3379-3383.

27. Semenov, K. N., Charykov, N. A., Keskinov, V. A., Piartman, A. K., Blokhin, A. A., Kopyrin, A. A. (2010). Solubility of light fullerenes in organic solvents. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 55(1), 13-36.

28. Murshed, S. S., Estellé, P. (2017). A state of the art review on viscosity of nanofluids. *Renewable and sustainable energy reviews*, 76,

29. Kasaeian, A., Eshghi, A. T., Sameti, M. (2015). A review on the applications of nanofluids in solar energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 584-598.

Received 16 November 2025

Approved 28 November 2025

Available in Internet 30 December 2025