

УДК 697.329:620.3:536.631

DOI 10.47049/2226-1893-2026-1-159-171

ВПЛИВ ДОМІШОК ФУЛЕРЕНУ C_{60} НА ЕФЕКТИВНУ ТЕПЛОЄМНІСТЬ НА ЛІНІЇ КИПІННЯ ТЕПЛОНОСІЯ DOWTHERM RP

О.А. Шумський

аспірант кафедри «Екоенергетики, термодинаміки та прикладної екології»
aleksei.shumskiy@gmail.com

Б.А. Квасницький

аспірант кафедри «Екоенергетики, термодинаміки та прикладної екології»
kvbogdan24@gmail.com

Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

Анотація. У роботі представлені результати експериментального дослідження впливу домішок фулерену C_{60} і технологічних низькокиплячих компонентів на ефективну теплоємність органічного теплоносія Dowtherm RP в інтервалі температур від 20 до 120 °С.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності плоских сонячних колекторів за рахунок цілеспрямованої зміни теплофізичних властивостей теплоносіїв. Вимірювання теплоємності проводилися методом монотонного нагріву в адіабатичному калориметрі змінної температури.

Встановлено, що в області від 95 до 110 °С спостерігається максимум ефективної теплоємності, що супроводжується зниженням швидкості нагрівання. Показано, що даний ефект обумовлений внеском прихованої теплоти випаровування низькокиплячих технологічних домішок, що містяться в теплоносії. Кількісна оцінка демонструє, що наявність 0,2-0,4 % домішок з прихованою теплою випаровування 300-400 кДж/кг здатна викликати приріст ефективної теплоємності до 0,08-0,12 Дж/(г·К). Порівняльний аналіз показав, що введення фулерену призводить до незначного зниження теплоємності (на 2-4 %) при 20-40 °С, відсутності істотних відмінностей у діапазоні 60-90 °С і можливого збільшенні теплоємності на 15-20 % в області температур 100-115 °С.

Отримані дані інтерпретуються з позицій формування міжфазного структурованого шару і агрегатних утворень у нанорідині. Отримані результати можуть бути використані під час розробки нового покоління нанотеплоносіїв для сонячних енергетичних систем із поліпшеними теплофізичними характеристиками.

Ключові слова: відновлювана енергетика, сонячні колектори, теплоносії, Dowtherm RP, нанотеплоносії, фулерен C_{60} , теплоємність, ефективна теплоємність, теплофізичні властивості, низькокиплячі домішки.

© Шумський О.А., Квасницький Б.А., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

UDC 697.329:620.3:536.631

DOI 10.47049/2226-1893-2026-1-159-171

EFFECT OF FULLERENE C₆₀ ADDITIVES ON THE EFFECTIVE HEAT CAPACITY ALONG THE BOILING LINE OF DOWTHERM RP HEAT TRANSFER FLUID

O.A. Shumskyi

PhD student of the department of «Eco-Energy, Thermodynamics and Applied Ecology»
aleksei.shumskyi@gmail.com

B.A. Kvasnytskyi

PhD student of the department of «Eco-Energy, Thermodynamics and Applied Ecology»
kvbogdan24@gmail.com

***Annotation.** The paper presents an experimental study of the effects of fullerene C₆₀ and low-boiling technological additives on the effective specific heat capacity of the organic heat-transfer fluid Dowtherm RP in the temperature range of 20-120 °C. The study is motivated by the need to improve the efficiency of flat-plate solar collectors through targeted modification of the thermophysical properties of heat-transfer fluids. Specific heat capacity measurements were carried out by the monotonic heating method employing a variable-temperature adiabatic calorimeter*

A peak in the effective specific heat capacity accompanied by a reduction in the heating rate was observed in the range of 95-110 °C. This effect is attributed to the latent heat of evaporation of low-boiling impurities present in the fluid. Quantitative assessment demonstrates that the presence of 0,2-0,4 % impurities with a latent heat of vaporization of 300-400 kJ/kg can cause an increase in effective heat capacity of up to 0,08-0,12 J/(g·K).

Comparative analysis showed that the introduction of fullerene leads to a slight decrease in heat capacity (by 2-4%) at 20-40 °C, no significant differences in the range of 60-90 °C, and a possible increase in heat capacity by 15-20% in the temperature range of 100-115 °C.

The obtained data are interpreted in terms of the formation of an interfacial structured layer and aggregate formations in the nanofluid. The results obtained can be used in the development of a new generation of nano-heat transfer fluids for solar energy systems with improved thermophysical characteristics.

***Keywords:** renewable energy, solar collectors, heat-transfer fluid, Dowtherm RP, nanofluid, fullerene C₆₀, heat capacity, effective heat capacity, thermophysical properties, low-boiling impurities.*

Вступ. Вирішення проблем глобальних кліматичних змін та обмеженість невідновлюваних ресурсів вимагає підвищення ефективності сонячних енергетичних установок. Ця проблема залишається однією з ключових завдань сучасної енергетики. Плоскі сонячні колектори широко застосовуються як для побутового, так і для технологічного теплопостачання. Їх експлуатаційні характеристики значною мірою визначаються фізико-хімічними властивостями теплоносіїв. Високі

значення спектральних коефіцієнтів поглинання, низькі витрати енергії на перекачування теплоносіїв (невисока в'язкість), термічна стійкість і відсутність хімічної взаємодії з конструкційними матеріалами залишаються одними з основних вимог під час вибору теплоносіїв для плоских сонячних колекторів середньо-температурних сонячних енергетичних установок [1, 2].

Високотемпературні органічні теплоносії типу Dowtherm RP використовуються в системах рідинно-фазового теплопереносу завдяки термічній стабільності та можливості роботи в широкому діапазоні температур, що робить їх перспективними для енергетичних і сонячних теплових установок. Разом з тим, дослідження показують, що зміна оптичних і теплофізичних властивостей за рахунок модифікації базових теплоносіїв наночастинками і високоефективними добавками є перспективним напрямком розвитку нового покоління теплоносіїв [3-7].

Вибір домішок наночастинок до поширених теплоносіїв є складним завданням з огляду на труднощі забезпечення вимог високої стійкості, що пред'являються до нанотеплоносіїв. Тому, в даний час найбільший інтерес викликає можливість застосування фулеренів у якості домішок до традиційно використовуваних органічних теплоносіїв. У літературі представлено кілька робіт, присвячених введенню наночастинок вуглецевих матеріалів у теплоносії для покращення їх властивостей. Як показують проведені дослідження, фулерен C_{60} має унікальні структурні та термодинамічні властивості, здатний впливати на оптичні та теплофізичні властивості рідин і утворювати стійкі нанофлюїди. [8-14]. Однак дослідження, в яких вивчалися властивості теплоносіїв «Dowtherm RP/фулерен C_{60} », практично відсутні [15]. Разом з тим слід зазначити, що в оглядовій роботі [16] показано, що додавання наночастинок дійсно може покращувати теплоперенесення в конвективних режимах, проте інтерпретація причин (броунівський рух, «мікроконвекція», зміни граничного шару, міжфазні ефекти та ін.) залишається неоднозначною і нерідко залежить від режиму течії, стабільності дисперсії та методики обробки даних. При цьому саме теплоємність наномодифікованих теплоносіїв досліджена помітно слабкіше, ніж теплопровідність і в'язкість: у багатьох роботах питому теплоємність або не вимірюють, або розраховують за простими правилами змішування, тоді як очікувані зміни теплоємності C_p часто становлять одиниці відсотків і виявляються порівнянними з невизначеністю калориметричних методів (особливо при високих температурах та поблизу фазових переходів) [16].

Експериментальні дані для систем з фулеренами [8] підтверджують, що ефект зміни теплоємності C_p може бути статистично малим і чутливим до температури/концентрації: для ароматичних теплоносіїв з домішками фулерену C_{60} на лінії кипіння спостерігаються зміни теплоємності порядку декількох відсотків і підкреслюється дефіцит універсальних кореляцій для опису теплоємності нанофлюїдів у широкому діапазоні температур. Аналогічно, в прикладних дослідженнях сонячних колекторів із вуглецевими нанодомішками [17-18] показано, що теплоємність може зменшуватися (що підвищує приріст температури за інших однакових умов). При цьому переваги щодо інтенсифікації теплообміну/ексергії доводиться порівнювати зі зростанням в'язкості та вимогами до довготривалої

стабільності дисперсії. Таким чином, можна констатувати, що вплив домішок наночастинок (включаючи фулерени) на ефективну теплоємність теплоносіїв, особливо на лінії кипіння, вивчено недостатньо. У літературі відсутні узгоджені масиви даних $C_p(T, w)$ для інженерно-перспективних теплоносіїв (мінеральних і синтетичних мастил/НТГ). Відхилення між даними в різних роботах часто обумовлені відмінностями в підготовці нанофлюїду, стабільності, теплової передісторії зразків і калориметричних процедурах. Це обґрунтовує необхідність цілеспрямованих вимірювань ефективної теплоємності для Dowtherm RP з домішками C_{60} за контрольованих умов і в релевантному діапазоні температур/тисків кипіння.

З огляду на це, актуальність даного дослідження визначається необхідністю вивчення впливу домішок фулерену C_{60} і технологічних домішок у теплоносії Dowtherm RP на значення ефективної теплоємності на лінії кипіння в широкому діапазоні температур. Практична цінність полягає в можливості застосування отриманих результатів для розробки нового покоління теплоносіїв із покращеними теплофізичними властивостями, що сприяє підвищенню ефективності сонячних енергетичних систем, зниженню експлуатаційних витрат і розширенню областей застосування плоских сонячних колекторів.

Мета роботи. Експериментальне дослідження методом монотонного нагрівання в адіабатному калориметрі особливостей впливу домішок фулерену C_{60} і технологічних домішок у теплоносії Dowtherm RP на значення ефективної теплоємності на лінії кипіння.

Об'єкти дослідження. Для приготування розчинів були використані такі матеріали: фулерен C_{60} , виробник Suzhou Dade Carbon Nanotechnology Co., Ltd., Китай, CAS# 99685-96-8, вміст основного компонента 99,5 мас. %; теплоносієм 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;

Під час підготовки зразка розчину фулерену C_{60} в теплоносії Dowtherm RP з масовою концентрацією 0,139 мас. % використовувалася технологія, раніше викладена авторами в роботі [15]. Ця технологія дозволяла очистити досліджуваний зразок від домішок розчиненого повітря і води, а також уникнути утворення кластерів в нанотеплоносії.

Результати експериментального дослідження. Дослідження ефективної теплоємності теплоносія Dowtherm RP і нанотеплоносія Dowtherm RP/ C_{60} (0,139 мас. %) було виконано методом монотонного нагрівання в калориметрі змінної температури, детальний опис якого наведено в [19]. Особливістю калориметричної посудини, в якій проводилися дослідження теплоємності, є її великий об'єм 165,54 см³ та наявність диференціальної термопари, яка дозволяє вимірювати радіальний градієнт температури зразка протягом усього експерименту. З метою виключення конвекції в досліджуваних зразках при збільшенні температури внутрішній об'єм калориметра був заповнений металевією ватою (маса 3,94 г). Теплоємність мідної вати була врахована у значенні постійної калориметра. Калориметр заповнювався досліджуваними зразками на 90 % внутрішнього об'єма. Таким чином, експериментальні дослідження теплоємності теплоносія виконувалися на лінії кипіння.

У таблиці 1 наведені основні характеристики об'єктів дослідження теплоємності теплоносія Dowtherm RP і нанотеплоносія Dowtherm RP/C₆₀ (0,139 мас.%).

Таблиця 1

Основні характеристики дослідження теплоємності теплоносія Dowtherm RP і нанотеплоносія Dowtherm RP/C₆₀

№	Зразок	Дата	Маса зразка, г	Потужність калориметричного нагрівача, Вт	Інтервал температури, °C	Час експерименту, хвилин
1	Dowtherm RP	27.01.2026	118,8921	1	20-120	480
2	Dowtherm RP	29.01.2026	118,8921	1	20-120	480
3	Dowtherm RP + C ₆₀	13.02.2026	117,9820	1	20-120	450
4	Dowtherm RP + C ₆₀	16.02.2026	117,9820	1	20-120	340

Аналіз отриманих експериментальних даних. Результати експериментального дослідження наведені на рисунках 1-4.

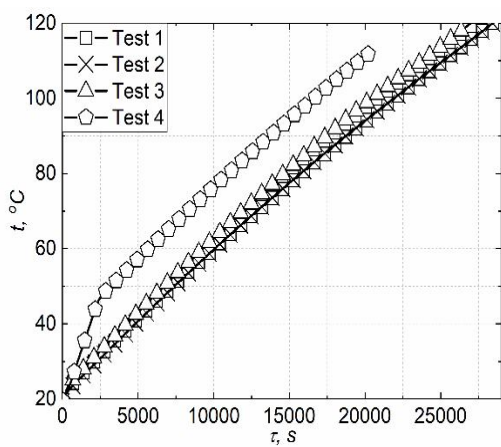


Рис. 1. Термограми тестів в ізольованій термодинамічній системі

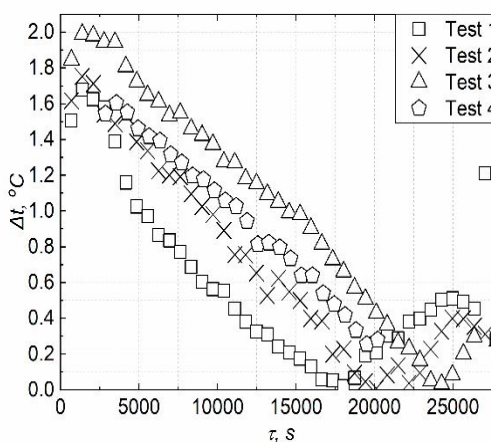


Рис. 2. Зміна радіальної різниці температур зразків від часу в ізольованій термодинамічній системі

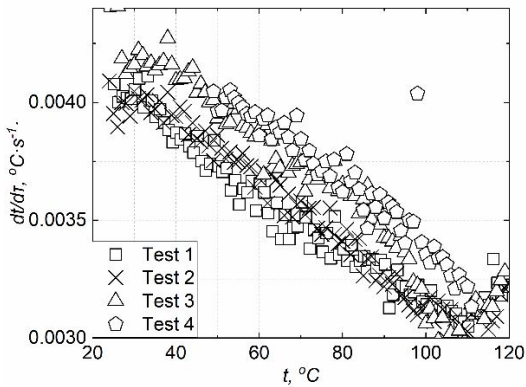


Рис. 3. Температурна залежність швидкості зміни температури зразків в ізольованій термодинамічній системі

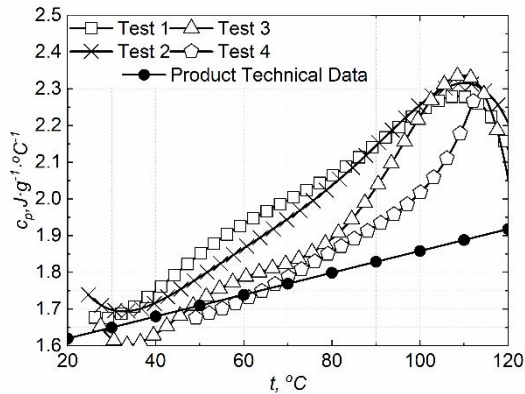


Рис. 4. Температурна залежність теплоємності досліджуваних зразків і паспортних даних виробника від температури в ізольованій термодинамічній системі

Проведений аналіз отриманих даних показує, що значення теплоємності теплоносія Dowtherm RP в інтервалі температур від 20 до 120 °C якісно не узгоджуються з наведеними в літературі даними [20]. В області температур від 95 до 110 °C на кривих $dt/d\tau$ та C_p спостерігається виражений екстремум, що супроводжується зниженням швидкості нагрівання, збільшенням ефективної теплоємності. Оскільки калориметр заповнений мідною ватою, природна конвекція в об'язі істотно послаблена, і гідродинамічна природа аномалії можлива тільки в разі початку процесу бульбашкового кипіння домішок у теплоносії Dowtherm RP.

Проведені додаткові дослідження з нагрівання зразка теплоносія під вакуумом у скляній колбі до 120 °C виявили утворення високотемпературного конденсату на стінках. Ці ефекти вказують на наявність невеликих концентрацій низькокиплячих компонентів у складі зразка теплоносія.

Таким чином, при монотонному нагріванні в адіабатичному калориметрі частина підведеної потужності може витратитися як на нагрівання теплоносія, так і на фазовий перехід домішок, що містяться в ньому:

$$P = mC_p \frac{dt}{d\tau} + \sum m_i L_i, \quad (1)$$

де P – потужність, що підводиться до калориметра, (Вт);

m – маса теплоносія, (г);

C_p – теплоємність теплоносія, (Дж/(г·К));

τ – час, секунд;

$dt/d\tau$ – швидкість зміни температури в часі (°C/секунда);

m_i і L_i – маса (г) та теплота кипіння (Дж/г) технологічних домішок у теплоносії Dowtherm RP.

У цьому випадку обчислювана теплоємність зразка є ефективною величиною, що включає внесок прихованої теплоти випаровування більш летких компонентів, що містяться в Dowtherm RP в якості домішок. У цьому випадку ефективне значення теплоємності $C_{p,eff}$ буде дорівнювати:

$$C_{p,eff} = C_{p,true} + \sum \frac{m_i L_i}{m(dt/d\tau)}, \quad (2)$$

де $C_{p,eff}$ – ефективна теплоємність, (Дж/(г·К));

$C_{p,true}$ – значення теплоємності чистого Dowtherm RP, (Дж/(г·К));

Виконаний аналіз показує, що навіть 0,2-0,4 % низькокиплячих домішок з прихованою теплою кипіння ($L \approx 300-400$ кДж/кг) може викликати абсолютну зміну теплоємності $\Delta C_p \approx 0,1$ Дж/(г·К). Зменшення ефективної теплоємності зразків при температурах вище 110 °С вказує на те, що парціальний тиск більш летких компонентів у паровій фазі збільшується, а їх концентрація в рідкій фазі зменшується (процес кипіння летких компонентів у рідкій фазі зменшується). При цьому теплоємність рідкої фази наближається до теплоємності чистого Dowtherm RP без домішок.

Кількісна оцінка показує, що помітний приріст теплоємності $\Delta C_p \approx 0,08-0,12$ Дж/(г·К) в інтервалі ~ 10 °С може бути обумовлений випаровуванням 0,2-0,4 % низькокиплячої домішки при теплоті випаровування близько 300-400 кДж/кг. Дана величина порівнянна з можливим вмістом залишкових технологічних домішок.

Таким чином, максимум теплоємності в області від 100 до 110 °С, ймовірно, обумовлений не зміною власної теплоємності бінарного теплоносія Dowtherm RP або домішок фулерену C_{60} , а внеском прихованої теплоти фазового переходу складових домішок.

Порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних показує, що в області температур від 20 до 40 °С нанотеплоносій має трохи меншу теплоємність (на 2-4 %) у порівнянні з чистим Dowtherm RP. В області температур від 60 до 90 °С відмінності в теплоємностях Dowtherm RP і нанотеплоносія мінімальні (в межах експериментальної похибки ± 3 %). Навпаки, в області від 100 до 115 °С спостерігається збільшення ефективної теплоємності C_p теплоносія і нанотеплоносія на 15-20 % відносно теплоємності базової рідини [20]. Цей ефект, ймовірно, пов'язаний з процесом кипіння летких домішок у теплоносії та нанотеплоносії по всьому об'єму калориметра, що призводить до появи об'ємної конвекції. Експериментальні дані щодо радіальної різниці температур у калориметрі, швидкості зміни температури теплоносія підтверджують цей висновок.

Вплив фулерену C_{60} на теплоємність теплоносія, на думку авторів, можливий через: формування на поверхні фулеренів і агрегатів фулерену міжфазного шару, утворення агрегатів і кластерів, структурування молекул рідини фази. Отримані результати відповідають сучасним уявленням про температурні залежності теплоємності нанорідин, до складу яких входить фулерен C_{60} . [8, 19].

Проведений аналіз отриманих експериментальних даних показує, що для розглянутої термодинамічної системи повний тепловий баланс можна розрахувати за рівнянням:

$$P = m_l C_{pl} \frac{dt}{d\tau} + \Delta H_{vap} \frac{dn}{d\tau} + m_v C_{pv} \frac{dt}{d\tau} + m_c C_{pc} \frac{dt}{d\tau}, \quad (3)$$

де m_l – маса рідкої фази в калориметрі, (г);

C_{pl} – теплоємність рідкої фази, (Дж/(г·К));

ΔH_{vap} – питома теплота випаровування легких домішок, (Дж/г),

$dt/d\tau$ – швидкість зміни маси парової фази, (г/с);

m_v – маса парової фази в калориметрі, (г);

C_{pv} – питома теплоємність парової фази, (Дж/(г·К));

m_c – маса конденсату на стінках калориметра, (г);

C_{pc} – питома теплоємність конденсату, (Дж/(г·К)).

З наведеного теплового балансу випливає, що для отримання коректних експериментальних даних про теплоємність багатокомпонентних теплоносіїв і нанотеплоносіїв необхідно забезпечувати максимальне заповнення калориметрів досліджуваними зразками (об'єм парової фази повинен бути мінімальним). Оскільки парціальний тиск компонентів при низьких температурах невеликий, виміряні значення ефективної теплоємності досліджуваних зразків близькі до даних по теплоємності, наведених у паспортних даних виробника [20]. Таким чином, коректність даних, наведених у [20], підтверджена отриманими експериментальними даними.

Повна відносна похибка, що визначається вимірюванням теплоємності зразків, може бути розрахована за формулою:

$$\left(\frac{\delta C_p}{C_p} \right)^2 = \left(\frac{\delta P}{P} \right)^2 + \left(\frac{\delta M}{M} \right)^2 + \left(\frac{\delta dt/d\tau}{dt/d\tau} \right)^2. \quad (4)$$

У цьому випадку сумарна інструментальна похибка вимірювання теплоємності з урахуванням шумових ефектів впливу домішок легких компонентів не перевищує 3 %.

Висновки

1. Експериментально досліджено температурну залежність ефективної теплоємності теплоносія Dowtherm RP і нанотеплоносія Dowtherm RP/C₆₀ в інтервалі температур від 20 до 120 °С методом монотонного нагрівання в адіабатичному калориметрі.

2. Виявлено максимум ефективної теплоємності в діапазоні 95-110 °С, зумовлений внеском прихованої теплоти випаровування низькокиплячих технологічних домішок, присутніх у теплоносії при їх концентрації близько 0,2-0,4 %.

3. Показано, що помітний приріст $\Delta C_p \approx 0,08-0,12$ Дж/(г·К) в інтервалі ~ 10 °С може бути пояснений фазовими перетвореннями домішок низькокиплячих компонентів, а не зміною істинної теплоємності базової рідини.

4. Уведення фулерену C_{60} у теплоносії Dowtherm RP має помірний температурно-залежний вплив на теплоємність: при низьких температурах спостерігається незначне зниження C_p , в діапазоні температур від 60 до 90 °C відмінності знаходяться в межах похибки експериментальних досліджень.

5. При температурах вище 100 °C збільшення ефективної теплоємності досліджуваних зразків теплоносія та нанотеплоносія від даних по теплоємності, наведених в паспортних даних виробника [20], може досягати 15-20 %.

6. Для отримання коректних даних про теплоємність багатоконпонентних теплоносіїв необхідно мінімізувати об'єм парової фази в калориметрі та враховувати внесок фазових переходів домішок у тепловий баланс системи.

З урахуванням зменшення в'язкості нанотеплоносія в порівнянні з чистим Dowtherm RP [15], а також позитивним впливом фулерену C_{60} на тертя в циркуляційному насосі [21-23] незначне зменшення теплоємності нанотеплоносія в порівнянні з теплоємністю Dowtherm RP не впливає на позитивну оцінку перспективності використання домішок фулерену C_{60} в плоских сонячних колекторах.

Дослідження виконано в межах реалізації проекту «Нові термоаккумулявальні наноматеріали для когенераційних сонячних енергетичних установок (розробка технології отримання, теплофізичні властивості та теплообмін)», переможця Конкурсу молодих вчених 2025 року, за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Otanicar, T.P., Phelan, P.E., & Golden, J.S. (2009). Optical properties of liquids for direct absorption solar thermal energy systems. *Solar Energy*, 83(7), 969-977. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.12.009>.
2. Kumar, P.G., Yuvaraj, N., Kumaresan, V., & Velraj, R. (2020). Selection of heat transfer fluids for solar thermal applications using multi-criteria decision-making tools. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(1), 595-612. <https://doi.org/10.1520/JTE20180539>.
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. <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. (2024). Performance Assessment of Flat Plate Solar Collector Using Simple and Hybrid Carbon Nanofluids at Low Thermal Capacity. *Applied Sciences*, 14(19), 8732. <https://doi.org/10.3390/app14198732>.
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. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114799>.

6. Nikulin, A., Moita, A.S., Moreira, A.L.N., Murshed, S.M.S., Humnic, A., Grosu, Y. & Khliyeva, O. (2019). Effect of Al₂O₃ nanoparticles on laminar, transient and turbulent flow of isopropyl alcohol. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 1032-1044. <https://doi.org/10.1016/j.ijheat-masstransfer.2018.10.114>.
7. Goel, N., Taylor, R. A., & Otanicar, T. (2020). A review of nanofluid-based direct absorption solar collectors: Design considerations and experiments with hybrid PV/Thermal and direct steam generation collectors. *Renewable Energy*, 145, 903-913. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.097>.
8. Motovoy, I. V., Zhelezny, V. P., Khliyeva, O. Y., Melnik, Y. Y., Diachenko, I. A., & Dmitriev, Y. D. (2020, December). Density, specific heat capacity and viscosity of fullerene C₆₀ solutions in tetralin. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1683, No. 3, p. 032027). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/3/032027>.
9. Zhelezny, V.P., Khanchych, K.Y., Motovoy, I.V., & Nikulina, A.S. (2021). Viscous behaviour of o-xylene/fullerene C₆₀ solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 328, 115416. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115416>.
10. 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. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116629>.
11. Mchedlov-Petrosyan, N.O. (2011). Fullerenes in molecular liquids. Solutions in «good» solvents: Another view. *Journal of Molecular Liquids*, 161(1), 1-12. <http://doi.org/10.1016/j.molliq.2011.04.001>.
12. Makhmanov, U., Ismailova, O., Kokhkharov, A., Zakhidov, E., & Bakhramov, S. (2016). Features of self-aggregation of C₆₀ molecules in toluene prepared by different methods. *Physics Letters A*, 380(24), 2081-2084. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.04.030>.
13. 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. <https://doi.org/10.1080/00222348.2012.721654>.
14. Mchedlov-Petrosyan, N.O. (2013). Fullerenes in liquid media: an unsettling intrusion into the solution chemistry. *Chemical reviews*, 113(7), 5149-5193. <https://doi.org/10.1021/cr3005026>.
15. Шумський, О., & Борисов, В. (2025). Дослідження коефіцієнта поглинання, густини та в'язкості розчинів нанофлюїду Dowtherm RP/фулерен C₆₀. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(4), P. 415-426. <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3354>.
16. Mirahmad, A., Shankar Kumar, R., Pato Doldán, B., Prieto Rios, C., & Díez-Sierra, J. (2025). Beyond thermal conductivity: a review of nanofluids for enhanced energy storage and heat transfer. *Nanomaterials*, 15(4), 302. <https://doi.org/10.3390/nano15040302>.

17. Adeola Borode, A.O., Tshephe, T.T., & Olubambi, P.O. (2025). A critical review of the thermophysical properties and applications of carbon-based hybrid nanofluids in solar thermal systems. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1509437. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1509437>.
18. Moulefera, I., Delgado Marín, J.J., Cascales, A., Montalbán, M.G., Alarcón, M., & Villora, G. (2025). Innovative application of graphene nanoplatelet-based ionanofluids as heat transfer fluid in hybrid photovoltaic-thermal solar collectors. *Scientific Reports*, 15, 6489. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91040-w>.
19. Zhelezny, V., Kvasnytskyi, B., Ivchenko, D., Hlek, Y., Khalak, V., Dauvergne, J. L., & Grosu, Y. (2026). An evaluation of influence of the fullerene C60 additives on the calorimetric and optical properties of n-eicosane in a wide range of parameters of the phase transition. *Thermochimica Acta*, 180242. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2026.180242>.
20. The Dow Chemical Company. (2001, November). DOWTHERM RP: Synthetic organic heat transfer fluid (Product technical data; Form No. 176-01473-1101 AMS). Dow.
21. Lee, Jaekeun, et al. «Enhancement of lubrication properties of nano-oil by controlling the amount of fullerene nanoparticle additives.» *Tribology Letters* 28.2 (2007): 203-208. <https://doi.org/10.1007/s11249-007-9265-2>.
22. Xing, Meibo, Ruixiang Wang, and Jianlin Yu. «Application of fullerene C60 nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors.» *International journal of refrigeration* 40 (2014): P. 398-403. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.12.004>.
23. Мороз С., Лук'янов, М., & Железний, В. (2017). Щільність і в'язкість розчинів холодоагенту r600a / мінеральне мастило / фуллерени C₆₀. *Refrigeration Engineering and Technology*, 53(1). <https://doi.org/10.15673/ret.v53i1.544>.

REFERENCES

1. Otanicar, T.P., Phelan, P.E., & Golden, J.S. (2009). Optical properties of liquids for direct absorption solar thermal energy systems. *Solar Energy*, 83(7), 969-977. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.12.009>.
2. Kumar, P.G., Yuvaraj, N., Kumaresan, V., & Velraj, R. (2020). Selection of heat transfer fluids for solar thermal applications using multi-criteria decision-making tools. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(1), P. 595-612. <https://doi.org/10.1520/JTE20180539>.
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. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.112832>.

4. Cruz, J.M., Crepaldi, S. A., Gutiérrez-Urueta, G. L., Rubio, J. D. J., Zacarias, 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. <https://doi.org/10.3390/app14198732>
5. Lamosa, R. A., Motovoy, I., Khliiev, N., Nikulin, A., Khliyeva, O., Moita, A. S. & del Barrio Elena, P. (2021). Tetralin+ fullerene C60 solutions for thermal management of flat-plate photovoltaic/thermal collector. *Energy Conversion and Management*, 248, 114799. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114799>
6. Nikulin, A., Moita, A.S., Moreira, A.L.N., Murshed, S.M.S., Humnic, A., Grosu, Y. & Khliyeva, O. (2019). Effect of Al₂O₃ nanoparticles on laminar, transient and turbulent flow of isopropyl alcohol. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 1032-1044. <https://doi.org/10.1016/j.ijheat-masstransfer.2018.10.114>.
7. Goel, N., Taylor, R.A., & Otanicar, T. (2020). A review of nanofluid-based direct absorption solar collectors: Design considerations and experiments with hybrid PV/Thermal and direct steam generation collectors. *Renewable Energy*, 145, 903-913. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.097>.
8. Motovoy, I.V., Zhelezny, V.P., Khliyeva, O.Y., Melnik, Y.Y., Diachenko, I.A., & Dmitriev, Y. D. (2020, December). Density, specific heat capacity and viscosity of fullerene C60 solutions in tetralin. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1683, No. 3, p. 032027). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/3/032027>
9. Zhelezny, V.P., Khanchych, K.Y., Motovoy, I.V., & Nikulina, A.S. (2021). Viscous behaviour of o-xylene/fullerene C60 solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 328, 115416. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115416>.
10. 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. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116629>.
11. Mchedlov-Petrosyan, N.O. (2011). Fullerenes in molecular liquids. Solutions in «good» solvents: Another view. *Journal of Molecular Liquids*, 161(1), 1-12. <http://doi.org/10.1016/j.molliq.2011.04.001>.
12. Makhmanov, U., Ismailova, O., Kokhkharov, A., Zakhidov, E., & Bakhramov, S. (2016). Features of self-aggregation of C60 molecules in toluene prepared by different methods. *Physics Letters A*, 380(24), 2081-2084. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.04.030>.
13. 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. <https://doi.org/10.1080/00222348.2012.721654>

14. Mchedlov-Petrosyan, N.O. (2013). Fullerenes in liquid media: an unsettling intrusion into the solution chemistry. *Chemical reviews*, 113(7), 5149-5193. <https://doi.org/10.1021/cr3005026>.
15. Shumskiy, O., & Borysov, V. (2025). Absorption coefficient, density, and viscosity of Dowtherm RP/fullerene C60 nanofluid solutions. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(4), 415-426. <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3354>.
16. Mirahmad, A., Shankar Kumar, R., Pato Doldán, B., Prieto Rios, C., & Díez-Sierra, J. (2025). Beyond thermal conductivity: a review of nanofluids for enhanced energy storage and heat transfer. *Nanomaterials*, 15(4), 302. <https://doi.org/10.3390/nano15040302>.
17. Adeola Borode, A.O., Tshephe, T.T., & Olubambi, P.O. (2025). A critical review of the thermophysical properties and applications of carbon-based hybrid nanofluids in solar thermal systems. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1509437. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1509437>.
18. Moulefera, I., Delgado Marín, J.J., Cascales, A., Montalbán, M.G., Alarcón, M., & Villora, G. (2025). Innovative application of graphene nanoplatelet-based ionanofluids as heat transfer fluid in hybrid photovoltaic-thermal solar collectors. *Scientific Reports*, 15, 6489. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91040-w>.
19. Zhelezny, V., Kvasnytskyi, B., Ivchenko, D., Hlek, Y., Khalak, V., Dauvergne, J. L., & Grosu, Y. (2026). An evaluation of influence of the fullerene C60 additives on the caloric and optical properties of n-eicosane in a wide range of parameters of the phase transition. *Thermochimica Acta*, 180242. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2026.180242>.
20. The Dow Chemical Company. (2001, November). DOWTHERM RP: Synthetic organic heat transfer fluid (Product technical data; Form No. 176-01473-1101 AMS). Dow.
21. Lee, Jaekeun, et al. «Enhancement of lubrication properties of nano-oil by controlling the amount of fullerene nanoparticle additives». *Tribology Letters* 28.2 (2007): 203-208. <https://doi.org/10.1007/s11249-007-9265-2>.
22. Xing, Meibo, Ruixiang Wang, and Jianlin Yu. «Application of fullerene C60 nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors». *International journal of refrigeration* 40 (2014): 398-403. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.12.004>.
23. Moroz S., Lukianov, M., & Zhelezny, V. (2017). Density and viscosity of solutions refrigerant R600a / mineral oil / fullerene C₆₀. *Refrigeration Engineering and Technology*, 53(1). <https://doi.org/10.15673/ret.v53i1.544>.

Дата надходження статті: 14.02.2026

Дата прийняття статті: 24.02.2026

Дата публікації статті: 02.04.2026