Фізика аеродисперсних систем. – 2025. – № 63. – С.149-155

# ТЕПЛОМАСООБМІН

УДК 536.4

***Копійка О.К., Іванов М.О.***
*Одеський національний університет імені І.І. Мечникова*
*E-mail: kopiyka@onu.edu.ua*
*ORCID: [1] https://orcid.org/0000-0001-9802-2256*
*2 https://orcid.org/0009-0006-1547-4067*

## Випаровування поодиноких краплин ізопропанолу з домішками наночастинок $Al_2O_3$

*У роботі експериментально досліджено процес випаровування поодиноких крапель ізопропанолу, модифікованого домішками наночастинок оксиду алюмінію $Al_2O_3$, за різних початкових концентрацій наночастинок і температур навколишнього середовища. Розглянуто нанофлюїди з масовою концентрацією наночастинок 0-3,06 %, отримані за допомогою ультразвукової диспергації та стабільні протягом тривалого часу. Випаровування крапель діаметром близько 2 мм досліджувалося в умовах стаціонарного слабкого потоку повітря в горизонтальній електричній печі в температурному діапазоні 370–505 К. Поточний розмір крапель визначався методом відеореєстрації з подальшою обробкою зображень.*

*Показано, що випаровування відбувається у дифузійному режимі та задовольняє закону $d^2$. Встановлено, що зі зростанням температури константа швидкості випаровування збільшується, тоді як зі збільшенням початкової концентрації наночастинок $Al_2O_3$ вона зменшується на 15-50 % порівняно з чистим ізопропанолом. Виявлено, що при концентраціях наночастинок понад 1 % константа швидкості випаровування прямує до асимптотичного значення, яке зростає з підвищенням температури. За відносно низьких температур і малих концентрацій домішок спостерігається нелінійний характер температурної залежності швидкості випаровування. Отримані результати свідчать, що вміст наночастинок є додатковим керуючим параметром, який дозволяє впливати на характерні часи випаровування та формування парогазових сумішей у дисперсних системах.*

***Ключові слова**: випаровування, крапля, ізопропан, наночастинки, константа випаровування.*

Нанофлюїди - стабільні колоїдні суспензії наночастинок в основній рідині, це відносно нові системи, що мають велику привабливість для застосування в процесах в яких важливу роль відіграють явища тепло і масообміну, реологічні властивості систем [1-2]. Наночастинки мають значно підвищену теплопровідність і мають потенційне застосування в області теплообміну, горіння, виробництва та медицини. Актуальним є використання наночастинок в якості домішок до вуглеводневих пальних, що пов’язано із можливістю впливати через зміну їх концентрації на процеси випаровування і горіння крапель цих пальних [2-3].

Нанофлюїди повинні бути стійкими до випадання в осад протягом тривалого часу, стійкими до агломерації та хімічно інертними [4]. Існуючі методи виготовлення нанофлюїдів поділяють на одноступінчасті і двоступінчасті. При одноступінчатих методах нанофлюїди отримують протягом одного технологічного

DOI: 10.18524/0367-1631.2025.63.347193

циклу [4]: випаровується електронним пучком у вакуумній камері, хімічні реакції відновлення під впливом мікрохвильового випромінювання. Їх перевагою є те, що наночастинки виходять, як правило, дуже дрібні (2-20 нм). Одержувані нанофлюїди характеризуються як стабільні, а агломерація наночастинок мінімізується. Головною проблемою нанофлюїдів є агломерація, що пояснюється їх високою поверхневою активністю. Саме агломерація призводить до того, що дрібні частинки з часом все-таки випадають в осад під впливом різниці густини з базовою рідиною.

При двоступеневих методах наночастинки спочатку виробляються, а потім вносяться в рідину. Вони добре працюють для частинок з металів та їх оксидів через їх меншу схильність до агломерації.

На заключному етапі приготування нанорідин для поліпшення її рівномірності можуть додаватися хімічні дисперсанти (ПАР), або застосовуватися ультразвукова і мікрохвильова обробка [4]. Зазначені обробки змінюють поверхневу активність зважених часток і таким чином впливають на утворення кластерів. Очевидно, що при цьому змінюються і базові властивості нанорідин.

У роботі [5] вивчили вплив доданих наночасток алюмінію на характеристики випаровування крапель н-декану і етанолу при природній і примусовій конвекції. Для нанорідин на основі етанолу при слабкій конвекції та при трьох температурах потоку (300 К, 330 К та 380 К) випаровування підпорядковується $d^2$-закону. Відхилення від цього закону спостерігається при природній конвекції і температурі 300 К. Зниження швидкості випаровування складає 30% при додаванні 0.5 мас. % частинок і 50% при 2.5 мас. %. Таким чином відхилення від закону $d^2$ більше поширено при більш високих концентраціях наночастинок і для базових рідин з більш високою температурою кипіння. Загальною рисою серед умов, для яких спостерігалося відхилення, є довгий час життя крапель.

Більш детальне описування методики випаровування крапель н-декана і етанолу з додавання наночастинок алюмінію діаметром 80 нм міститься у роботі [6]. Для отримання гомогенної суміші з мінімальним ступенем агломерації, частинки змішували з рідким паливом і енергійно перемішували вручну. Потім суміш обробляли ультразвуком за допомогою ультразвукового пристрою протягом 5 хв. Після обробки ультразвуком, суспензія етанолу з добавками наночастинок Al (1 мас.%) протягом 24 год не спостерігалося явного осадження. При заміні етанолу на н-декан суспензія була стабільною тільки протягом 20 хв, після чого спостерігалося седиментація. Додавання сорбітан-олеата підвищувала стабільність до близько 5 год. Суспензії на основі етанолу набагато стабільніше через більш високу в'язкість етанолу, а також через здатність етанолу утворювати гелеві структури навколо частинок [6, 7].

В роботі [8] досліджували випаровування сумішей метилового естеру з дизельним паливом, до яких додавали наночастинки діоксиду церію (концентрація до 2%) при 873 К та 973 К. Результати показали, що: при високій температурі низька концентрація наночастинок сприяла поглинанню тепла краплею, тим самим зменшуючи час випаровування краплі, тоді як висока концентрація наночастинок стримувала випаровування крапель, тим самим збільшуючи час випаровування краплі.

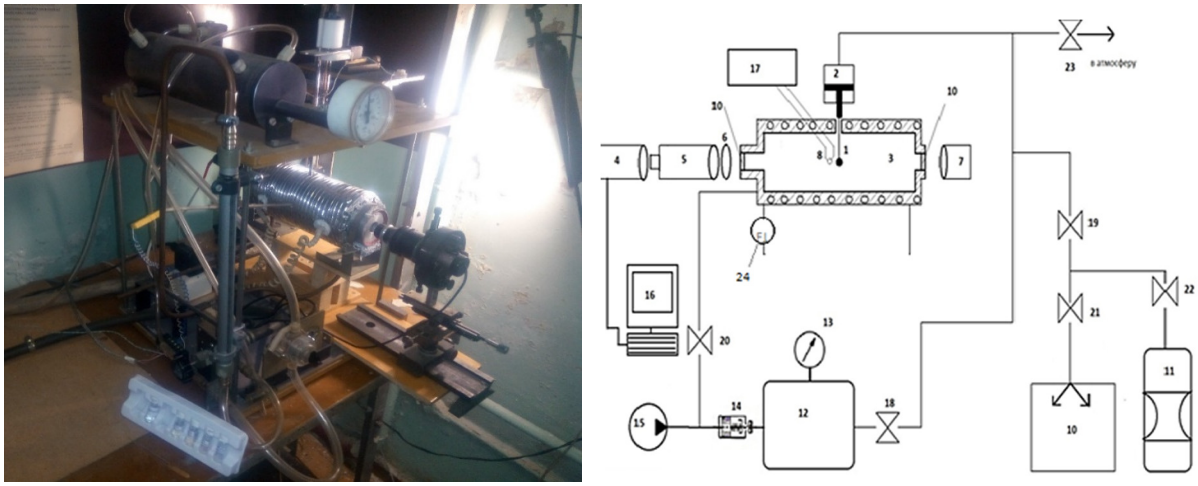


**Рис. 1.** Фото і схема установки: 1 - підвіс; 2 - пневматичний подаючий пристрій з мікрогвинтами; 3 - горизонтальна піч з електричним нагрівальним елементом; 4 - відеокамера Hardity IC - 490; 5 - мікроскоп; 6 - поляризаційний фільтр; 7 - освітлювач; 8 - датчик виміру температури (хромель-алюмелева термопара); 9 - вакуумний насос; 10 - оглядові вікна; 11 - вакуумна посудина; 12 - демпферна посудина; 13 - манометр; 14 - реле тиску; 15 - компресор; 16 - комп'ютер; 17 - потенціометр; 18-23 - замочні крани, 24 - витратомір

**Метою роботи** є виявлення особливостей, які виникають при випаровуванні поодиноких краплин ізопропанолу, модифікованого домішками наночастинок $Al_2O_3$ при різних їх початкових концентраціях та температурах навколишнього середовища.

**Експериментальна установка і методика проведення експерименту.** Основний конструктивний елемент (рис. 1) – горизонтально циліндрична електрична піч (діаметр 5 см, довжина 24 см), у верхній частині якої розташовувався отвір для введення підвісу з краплею досліджуваної речовини.

У роботі випаровували краплі ізопропілового спирту з додаванням частинок $Al_2O_3$ діаметром 50 нм, які створювалися за допомогою ультразвукового диспергатора УЗ-диспергатора. Концентрації наночастинок 0, 0.1, 0.27, 1 та 3.06 мас. % (рис.2). Нанофлюїди були стабільними без візуального осадження протягом як мінімум 3 годин при найвищих концентраціях $Al_2O_3$ (3.06%) та впродовж декількох днів при найнижчих концентраціях (0.1%) [24].

Експерименти проводилися в умовах слабкого струму повітря, швидкість якого дорівнює $\upsilon = 6.6 \cdot 10^{-3}$ м/с. Крапля діаметром приблизно 2мм за допомогою скляного підвісу поміщалася на П-образний підвіс з діаметром спаю 250 мкм. Інтервал часу для введення краплі в об'єм печі не перевищував 0,5 с. Температура середовища в печі визначалася за допомогою стандартної хромель-алюмелевой термопари, розміщеної поблизу краплі.

В ході експерименту, за допомогою відеозйомки фіксувався поточний розмір краплі досліджуваної суміші. Зйомка і підсвічування об'єкту проводилася через оглядові вікна з кварцевого скла у світлі, що проходить, із швидкістю 5 кадрів/с з дозволом 640×480 пікселів. На рис. 3 представлена типова кінограма процесу випару краплі ізопропілового спирту при температурі середовища $T_\infty$ =370

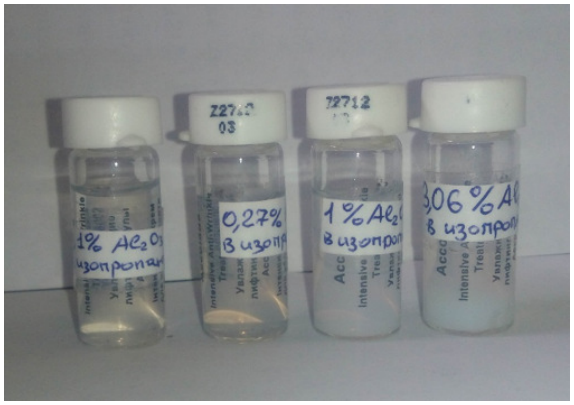


**Рис. 2.** Фото сумішей ізопропілового спирту в концентраціях 0.1, 0.27, 1 та 3.06 мас. % $Al_2O_3$

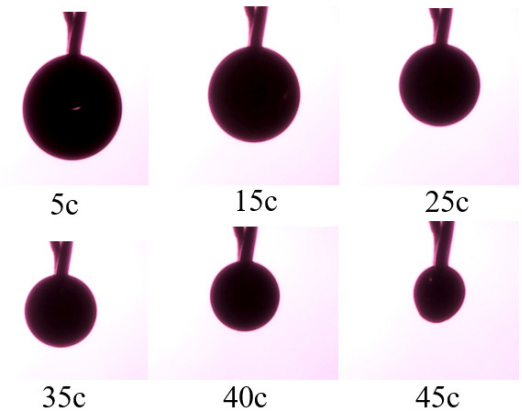


**Рис. 3.** Кінограма процесу випаровування краплі ізопропілового спирту при температурі середовища $T_\infty$ =370К

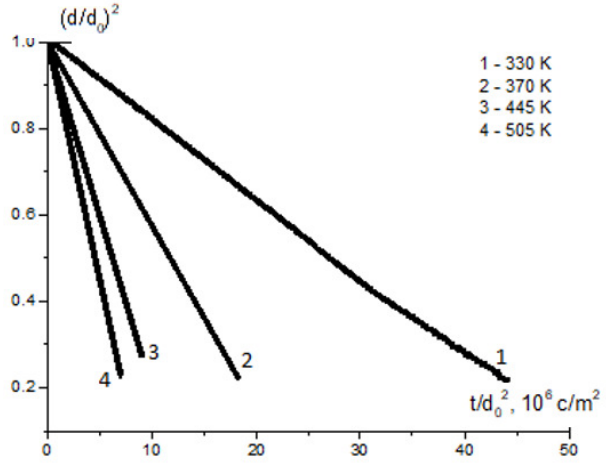


**Рис. 4.** Динаміка зміни розміру крапель ізопропілового спирту з домішками 1% $Al_2O_3$ по масі при різних температурах середовища

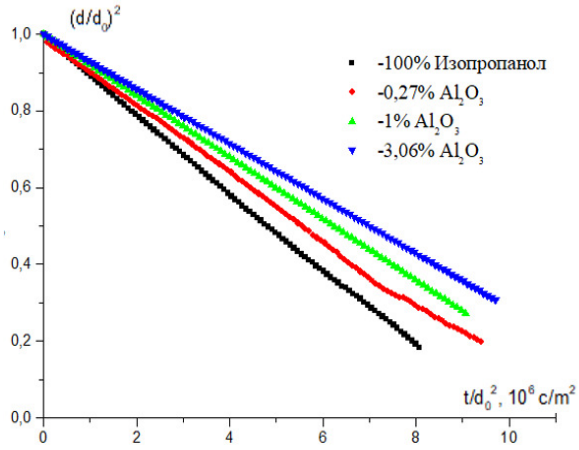


**Рис. 5.** Динаміка випаровування крапель ізопропілового спирту з домішками $Al_2O_3$ при температурі середовища $T_\infty$ = 445К

К. Алгоритм обробки зображень допускав покадровий підрахунок сумарної кількості пікселів для вертикального перерізу краплі, що давало можливість, використовуючи умову нормування для пікселя, визначати поточне значення площі перерізу краплі і її ефективний діаметр. При цьому передбачалося, що крапля має сферичну форму ( рис. 3).

**Аналіз результатів.** Результати експериментальних досліджень процесу випаровування поодиноких крапель суміші ізопропіловий спирт/nAl зручно представити у вигляді залежності квадрата діаметру краплі від часу (рис. 4-5), нормованих на квадрат початкового діаметру краплі $(d/d_0)^2 = f(t/d_0^2)$. На рис 4 та 5 показано характерні залежності при зміні температури навколишнього повітря і початкової концентрації наночастинок в ізопропіловому спирті.

Аналіз представлених даних показав, що процес випаровування крапель

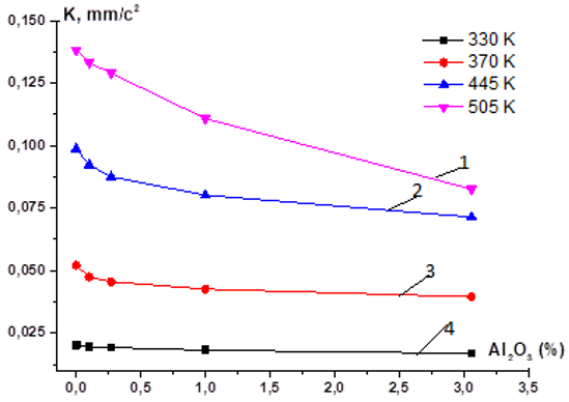


**Рис. 6.** Залежність константи випаровування нанофлюїда від початкової концентрації наночастинок $Al_2O_3$ при різних температурах середовища: 1) 330 К; 2) 370 К; 3) 445 К; 4) 505 К

**Таблиця 1.** Константа випаровування крапель (в $10^{-2}$ мм$^2$/с) з нанодомішками $Al_2O_3$

| Вміст $Al_2O_3$, % | $T_\infty$, К | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 330 К | 370 К | 445 К | 505 К |
| 0 | 2.03 | 5.22 | 9.87 | 13.82 |
| 0.1 | 1.96 | 4.74 | 9.23 | 13.32 |
| 0.27 | 1.93 | 4.56 | 8.75 | 12.90 |
| 1.0 | 1.82 | 4.26 | 8.02 | 11.08 |
| 3.06 | 1.69 | 3.96 | 7.14 | 8.26 |

модифікованого домішками наночастинок $Al_2O_3$ відбувається в дифузійному режимі, а константа швидкості випаровування очікувано збільшується при зростанні температури. Відповідно до поставленої задачі визначалась ступінь впливу початкової концентрації наночастинок на величину константи випаровування крапель модифікованого пального.

Для більш зручного аналізу, отримана шляхом обробки представлених вище експериментальних даних, залежність констант випаровування від концентрації $Al_2O_3$, для досліджуваних нанорідин представлена на рис. 6 та табл.1

Як видно з аналізу цих даних, із зростанням початкової концентрації n/$Al_2O_3$ константа випаровування асимптотично зменшується від 25% до 50% , і така тенденція збільшується із зростанням температури. Причому весь ефект спостерігається при дуже невеликій (до 3%) масовій концентрації останніх. Таким чином, можна стверджувати, що вміст наночастинок є ще одним додатковим керуючим параметром, за допомогою якого можна впливати на характерний час утворення парогазової суміші в різноманітних дисперсних системах. Можливий механізм впливу початкової концентрації нелетючих наночастинок на швидкість випаровування нанофлюїду базується на припущенні щодо зменшення питомої площі поверхні краплі з якої відбувається випаровування ізопропанолу.

Проаналізувавши данні представлені на графіках що ілюструють динаміку зміни розміру крапель ізопропілового спирту з домішками $Al_2O_3$ при різних температурах середовища і початкових концентраціях домішок, можна констатувати більш нелінійний характер температурної залежності константи швидкості випаровування краплі на ділянці відносно низьких температур і початкових концентрацій наночастинок. Існування виявлених в експерименті особливостей випаровування індивідуальних капель нанофлюїдів, в певній мірі, може бути пояснена різною ступеню температурної залежності співвідношення швидкостей внутрішньо крапельних процесів і випаровування рідини.

**Висновки.** Таким чином показано, що швидкість випаровування індивідуальних крапель ізопропілового спирту виявилася дещо більшою ніж для розчинів наночастинок $Al_2O_3$ з розміром 50нм. При збільшенні початкової концентрації наночастинок, швидкість випаровування знижується від 15 до 50 % при збільшенні масової концентрації наночастинок $Al_2O_3$ до 3% в порівнянні з чистим ізопропанолом в діапазоні досліджуваних температур середовища (370К-505К).

Визначено, що при початковій концентрації наночастинок приблизно більше за 1%, константа швидкості випаровування краплі модифікованого пального прагне до деякого асимптотичного значення, яке збільшується із зростанням температури. При відносно низьких температурах середовища (330 К) і початкових концентраціях наночастинок спостерігається нелінійний характер температурної залежності константи швидкості випаровування краплі. Одною з можливих причин появи особливостей випаровування індивідуальних капель нанофлюїдів порівняно із базовою речовиною, є різниця за ступеню температурної залежності співвідношення швидкостей внутрішньо крапельних процесів і випаровування рідини.

**Література:**


1. *Pourhoseini S.H., Ghodrat Maryam* Experimental investigation of the effect of $Al_2O_3$ nanoparticles as additives to B20 blended biodiesel fuel: Flame characteristics, thermal performance and pollutant emissions // Case Studies in Thermal Engineering 27 (2021) 101292 https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101292
2. *Junshuai Lv, Su Wang and Beibei Meng*.The Effects of Nano-Additives Added to Diesel-Biodiesel Fuel Blends on Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine: A Review. Energies 2022, 15, 1032. https://doi.org/10.3390/en15031032
3. *Kaushik, Y.; Verma, V.; Saxena, K.K.; Prakash, C.; Gupta, L.R.; Dixit, S.* Effect of $Al_2O_3$ Nanoparticles on Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Fuelled with Diesel–Neem Biodiesel Blends. Sustainability 2022, 14, 7913. https://doi.org/10.3390/su14137913
4. *Шимчук, Н. А., & Геллер, В. З.* Influence of various factors on the thermal conductivity of nanofluids. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2014. 6(11(72), 35–40. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.31386
5. *Genzhu Jiang, Jun Yan, Gang Wang, Minglu Dai, Cangsu Xu, Jigang Wang.* Effect of nanoparticles concentration on the evaporation characteristics of biodiesel // Applied Surface Science 492 (2019) 150–156 https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.06.118
6. *Murshed S., Tan S.H., Nguyen N.T.* Temperature dependence of interfacial properties and viscosity of nanofluids for droplet-based microfluidics // J. Physics D. – 2008. - Vol. 41, no 8. - P. 085502. DOI 10.1088/0022-3727/41/8/085502
7. *Gan Y., Qiao L.* Evaporation characteristics of fuel droplets with the addition of nanoparticles under natural and forced convections // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2011. - P. 10. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.07.003
8. *Shin Y.J., Shen Y.H.* Preparation of coal slurry with organic solvents // Chemosphere 68. – 2007. – P. 389–393. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.12.049.

*Kopiyka O.K., Ivanov M.O.*

# Evaporation of individual isopropanol droplets containing $Al_2O_3$ nanoparticle additives

**SUMMARY**

*This work presents an experimental study of the evaporation of individual isopropanol droplets modified with aluminum oxide ($Al_2O_3$) nanoparticles at various initial nanoparticle concentrations and ambient temperatures. Nanofluids with a nanoparticle mass fraction of 0–3.06% were prepared using ultrasonic dispersion and exhibited long-term stability. Evaporation of droplets with an initial diameter of approximately 2 mm was investigated under conditions of a steady weak air flow in a horizontal electric furnace over a temperature range of 370–505 K. The instantaneous droplet size was determined using video recording followed by digital image processing.*

*It is shown that droplet evaporation occurs in the diffusion-controlled regime and follows the classical $d^2$-law. An increase in ambient temperature leads to an increase in the evaporation rate constant, whereas an increase in the initial concentration of $Al_2O_3$ nanoparticles results in a reduction of the evaporation rate by 15–50% compared to pure isopropanol. It is found that at nanoparticle concentrations above approximately 1%, the evaporation rate constant approaches an asymptotic value that increases with temperature. At relatively low ambient temperatures and low nanoparticle concentrations, a nonlinear temperature dependence of the evaporation rate constant is observed. The obtained results indicate that the presence of nanoparticles acts as an additional control parameter, allowing regulation of characteristic evaporation times and vapor–gas mixture formation in dispersed systems.*

***Keywords:*** *evaporation, droplet, isopropanol, nanoparticles, evaporation rate constant.*