

УДК 536.46

**Орловська С.Г.**

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, Одеса, Україна,  
вул. Дворянська, 2, 65082, e-mail: [svetor25@gmail.com](mailto:svetor25@gmail.com)

## **Експериментальні дослідження випаровування крапель парафінів**

*Парафін є легкоплавким матеріалом, який може використовуватись в якості екологічно чистого і високоенергетичного палива. Також його можна розглядати як перспективний матеріал з фазовими переходами, здатний акумулювати тепло. Відомо, що період індукції спалахування крапель парафіну складається з послідовних стадій, основними фізичними механізмами яких є плавлення та випаровування. В роботі досліджуються процеси випаровування крапель парафінів октадекану та докозану в повітрі при різних температурах. Розроблена методика дослідження кінетики випаровування крапель парафінового палива з використанням цифрової зйомки об'єкта дослідження та комп'ютерної обробки зображень.*

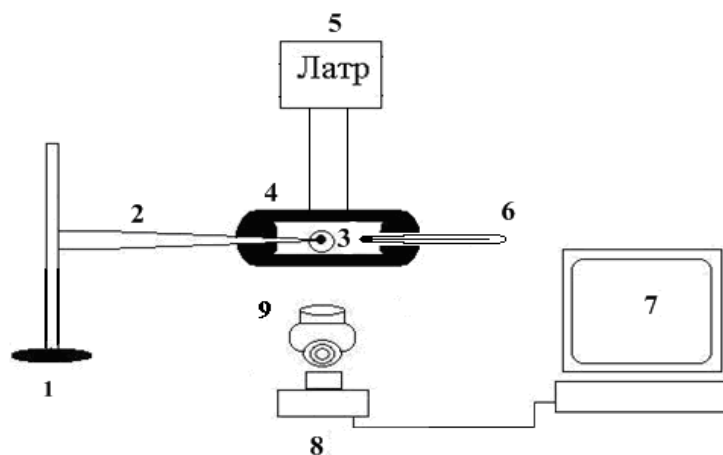
*Доказано, що кінетика випаровування досліджуваних алканів описується лінійним законом зміни квадрата діаметра краплі з часом. Оцінено швидкості випаровування цих парафінів та знайдено сталі випаровування. Такі дані в літературних джерелах щодо цих парафінів відсутні. Експериментально знайдені значення сталих випаровування дали змогу оцінити час повного випаровування крапель та визначити коефіцієнт дифузії пари парафіну в повітрі при різних температурах. Ця інформація є цінною для прогнозування процесів тепломасообміну аерозолів даних алканів в реакційних об'ємах. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що швидкість випаровування октадекану більше ніж в 4 рази вища, ніж докозану. Отримано, що при досягненні температурою повітря визначених значень швидкість випаровування вказаних алканів значно зростає.*

**Ключові слова:** парафіни, алкани, випаровування, стала випаровування, коефіцієнт дифузії

Процеси випаровування і горіння крапель рідкого палива є предметом широких експериментальних і теоретичних досліджень. Отримано експериментальні дані відносно механізмів випаровування і горіння вуглеводневих палив, розроблені детальні фізико-математичні моделі високотемпературного тепломасообміну, які дають можливість розрахувати температуру займання і горіння краплі, період індукції, час горіння [1-4].

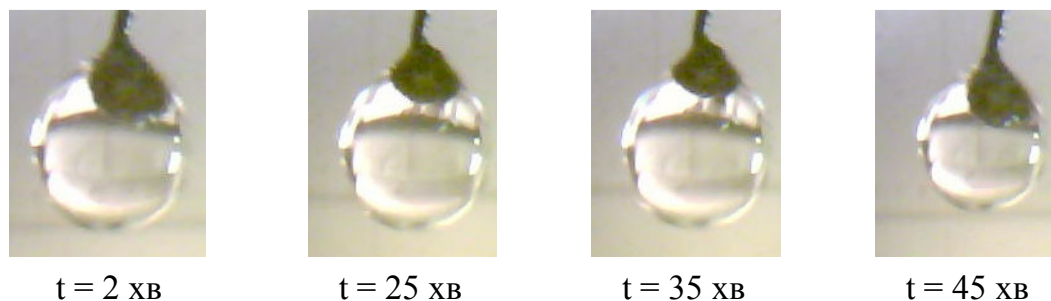
Парафіни або алкани відзначаються тим, що при організації процесу горіння вони використовуються в твердому стані. Спалахують і горять дані речовини в рідкому стані.

Як відомо, нормальні алкани характеризуються відносно низькими температурами переходу в рідкий стан ( $26\div 65^{\circ}\text{C}$ ) і в той же час високими значеннями прихованої теплоти плавлення і ентальпії (теплоти згоряння). Поєднання даних властивостей з хімічною інертністю при нормальних умовах визначає широкий спектр можливих пропозицій до використання. Одна із них - це використання парафіну в якості екологічно чистого палива [5,6]. Іншим перспективним напрямком використання парафінів є створення термоакумулюючих пристроїв на основі матеріалів з фазовими переходами [7].



**Рис.1.** Блок - схема експериментального стенду.

1 – штатив; 2 – підвіс; 3 – крапля; 4 – піч; 5 – латр; 6 – термометр; 7 - персональний комп'ютер; 8 – цифрова камера; 9 – мікроскоп.

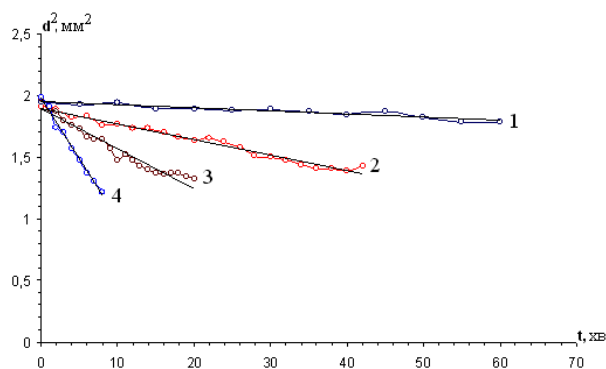


**Рис.2.** Зображення процесу випаровування краплі октадекану  $d_b = 1,39$  мм в різні моменти часу при температурі  $T = 428$  К.

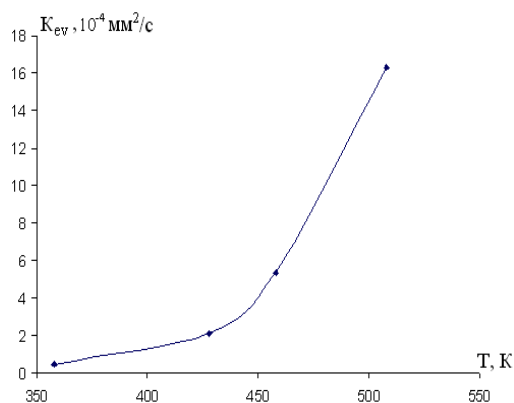
Попередніми дослідженнями [8-10] доказано, що період індукції спалахування крапель парафіну складається із послідовних стадій, основними фізичними механізмами яких є плавлення та випаровування. Метою даної роботи є вивчення кінетики випаровування крапель алканів октадекана ( $C_{18}H_{38}$ ) і докозана ( $C_{22}H_{46}$ ) та визначення коефіцієнту дифузії пари у повітрі.

Кінетика випаровування крапель насичених вуглеводнів октадекану і докозану вивчалась на спеціально розробленому експериментальному стенді представленому на рис.1.

Процес випаровування відбувався в повітряному середовищі, нагрітому в інтервалі температур  $T_g = 358-505$  К при атмосферному тиску. Крапля парафіну (3) заданого початкового діаметру навішувалась на підвіс (2) і вносились в нагріту до певної температури піч (4). Температура печі задавалась за допомогою ЛАТРа (5) і вимірювалась термометром (6). Зміна діаметру фіксувалась через мікроскоп (9) з 24-х кратним збільшенням за допомогою Web – камери (8). Результати зйомки передавались на персональний комп'ютер (7). На рис. 2 надаються зображення краплини октадекану в процесі випаровування в різні моменти часу. Крапля рідини знаходилась на сферичному металевому підвісі.



**Рис. 3.** Залежність квадрату діаметра крапель октадекану  $d_b = 1.4$  мм від часу при різних температурах: 1) 358К; 2) 428К; 3) 458К; 4) 508К.



**Рис. 4.** Залежність сталої випаровування краплі октадекана від температури  $d_b=1.39$  мм

**Таблиця.1.** Характеристики випаровування крапель та коефіцієнтів дифузії парів парафінового палива на основі октадекана,  $\langle d_b \rangle = 1.39$  мм.

$T, K$	$K_{ev}, 10^{-4} \cdot \text{мм}^2/\text{с}$	$t_{ev}, \text{хв.}$ (до $d = 1.2$ мм)	$t_{ev}(\text{full}) = d_b^2 / K_{ev}, \text{хв}$
358	0.433	290	445
428	2.08	55	92
458	5.35	25	36
508	16.3	8	11.8

В подальшому, виконувалась комп’ютерна обробка отриманих зображень, які дали змогу отримати залежність зміни діаметру краплі та квадрату діаметра краплі октадекану від часу (рис.3).

Встановлено, що залежність квадрату діаметра від часу має лінійний характер (виконується закон Срезневського). По тангенсу кута нахилу можна отримати сталу швидкості випаровування. Знаючи сталу випаровування можна оцінити час повного випаровування краплі  $t_{ev}(\text{full})$  до діаметру  $d=0$ .

В таблиці 1 для заданих температур повітря надаються значення отриманих сталих випаровування  $K_{ev}$  та часу випаровування  $t_{ev}$  для середнього діаметру краплі 1.39 мкм.

З таблиці 1, впливає, що збільшення температури газу в 1.3 рази призводить до зростання швидкості випаровування крапель октадекану в 12 разів.

Отримані результати дали змогу побудувати залежність сталої випаровування від температури, яка представлена на рис.4.

Залежність сталої швидкості випаровування від температури носить не лінійний характер. Починаючи з температур більших 430 K виникає різке збільшення швидкості випаровування.

Знання сталої швидкості випаровування дає змогу визначити коефіцієнт дифузії пари ( $D$ ) вказаних алканів в повітрі при заданій температурі :

$$K_{ev} = \frac{8D}{\rho_l} (C_{n_s} - C_{n_\infty}), \quad (1)$$

де  $\rho_l$  - густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ,  $C_{ns}$ ,  $C_{n\infty}$  – відповідно концентрації насиченої пари рідин біля поверхні краплі та в повітрі. Для алканів  $C_{n\infty} = 0$ .

З урахуванням природної конвекції формула (1) може бути записана у вигляді:

$$K_{ev} = \frac{4D}{\rho_l} C_{ns} \cdot Nu, \quad (2)$$

$$\text{де } Nu = 2 + 0.54 Re^{1/2}, \quad Re = \sqrt{0.5 \cdot Gr}, \quad Gr = \frac{gd^3(T - T_g)}{273 \cdot \nu_g^2}. \quad (3)$$

В (3)  $Nu$ ,  $Re$ ,  $Gr$  – числа Нуссельта, Рейнольдса та Грасгоффа,  $\nu_g$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря.

Виходячи із формул (1) та (2), запишемо вираз для розрахунку коефіцієнту дифузії без урахування природної конвекції:

$$D = \frac{K_{ev} \cdot \rho_l}{8C_{ns}}, \quad (4)$$

та з урахуванням:

$$D^* = \frac{K_{ev} \cdot \rho_l}{4C_{ns} (Nu)}. \quad (5)$$

Концентрація насиченої пари залежить від температури. Скористаємось наступною залежністю тиску насиченої пари октадекана від температури:

$$\ln P_{ns} = A \ln(T) + B/T + C + DT^2, \quad (6)$$

де  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  – сталі величини.

Знаючи тиск, знайдемо концентрацію насиченої пари:

$$C_{ns} = \frac{P_{ns} \cdot M}{RT}, \quad (7)$$

де  $M$  – молярна маса парафіну.

Використовуючи (3) – (5) розрахуємо коефіцієнти дифузії октадекану при різних температурах з урахуванням та без урахування природної конвекції. Наведені в таблиці 2 розрахунки вказують на те, що врахування природної конвекції приводить до зменшення коефіцієнту дифузії на 20 %.

Згідно формули  $V_c = \frac{Re \cdot \nu_g}{d}$ , була проведена оцінка швидкості природної конвекції та отримано значення  $V_c = 12.2 \text{ мм/с}$  в умовах нашого експерименту.

**Таблиця 2.** Коефіцієнт дифузії пари октадекана в повітрі,  $d_b = 1.39 \text{ мм}$ .

$T, K$	$D, 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$	$D^*, 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$
428	0.0048	0.0038
508	0.0223	0.0179

**Порівняльна характеристика кінетики випаровування крапель докозану та октадекану.** Для випаровування крапель докозану також було отримано, що залежність квадрату діаметра від часу має лінійний характер (рис.5). По

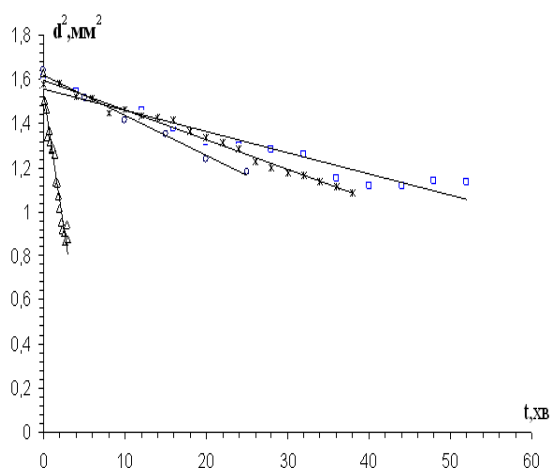
тангенсу кута нахилу було отримано сталу швидкості випаровування. В таблиці 3 представлено отримані дані для сталої швидкості випаровування  $K_{ev}$ , та часу випаровування  $t_{ev}$  для досліджуваних температур повітря і середнього початкового діаметру крапель докозану  $\langle d_b \rangle = 1.28$  мм.

Із порівняння таблиць 1 і 3 випливає що, краплі октадекану випаровуються в 4,5 рази швидше, ніж краплі докозану ( $\langle T \rangle = 505$  K).

На рис.6 надаються в порівнянні температурні залежності сталих випаровування октадекану та докозану. Видно, що при визначених температурах спостерігається різке збільшення сталих випаровування. Для октадекану це температура близько 450 K, а для докозану – 500 K.

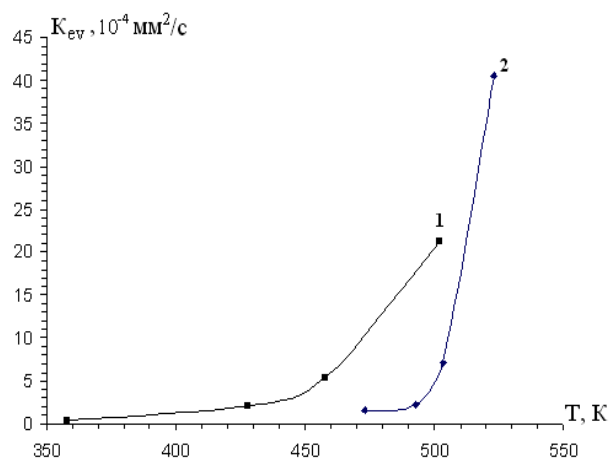
В інтервалі температур  $T = 450 \div 500$  K стала швидкості випаровування октадекану в 5 разів більша, ніж докозану.

**Висновки.** Таким чином, проведено дослідження кінетики випаровування крапель парафінів: октадекану і докозану в інтервалі температур 350÷500K. Знайдено сталі випаровування цих речовин, оцінено час випаровування та коефіцієнти дифузії пари в повітрі.



**Рис. 5.** Залежність квадрату діаметра краплин докозану від часу:

□ –  $T_g = 473$  K; \* –  $T_g = 493$  K;  
○ –  $T_g = 503$  K; Δ –  $T_g = 523$  K.



**Рис. 6.** Порівняльна залежність сталих випаровування октадекана (1) та докозана (2) в залежності від температури оточуючого середовища.

**Таблиця 3.** Характеристики випаровування крапель докозана,  $\langle d_b \rangle = 1,28$  мм.

$T, K$	$K_{ev}, 10^{-4} \text{ мм}^2/\text{с}$	$t_{ev}, \text{хв.}$ (до $d=0,9$ мм)	$t_{ev}(\text{full}) = d_b^2 / K_{ev}, \text{хв}$
473	1.58	52	103
493	2.23	38	73
503	3.03	25	54

### Література:

1. *Кумагаи С.* Горение: Пер. с японского. – М.: Химия, 1980. – 256 с.

2. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. – М.: Изд. Московского университета, 1967. – 442 с.
3. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
4. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
5. Santos L.M.C., Almeida L.A.R., Fraga A.M., Veras C.A.G. Experimental investigation of a paraffin based hybrid rocket.// Thermal Engineering. – July 2006. – Vol.5, № 01. – P. 8-12.
6. Timothy R. Brown, Michael C. Lydon Testing of paraffin – based hybrid rocket fuel using hydrogen peroxide oxidizer// Department of Astronautical Engineering, USAFA. Colorado Space Grant Consortium. – 2005. – P. 1-8.
7. Abhay B. Lingayat, Yogesh R. Suple. Review On Phase Change Material As Thermal Energy Storage Medium / Int. J. of Engineering Research and Applications. – 2013. – V. 3, Iss. 4. – P.916-921.
8. Орловська С.Г., Каримова Ф.Ф., Шкороподо М.С., Бондаренко А.А. Дослідження впливу електричного поля на плавлення октадекану//Хімія і фізика твердого тіла . – 2016. – Том 17, № 2. – С. 256-261.
9. Орловська С.Г., Шкороподо М.С., Каримова Ф.Ф., Односталко А.О. Вивчення високотемпературного тепломасообміну і кінетики фазових перетворень при горінні вищих алканів в повітрі// Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. – Т.16, №2.- С.347-350.
10. Orlovskaya S.G., Shkoropado M.S., Karimova F.F. Electric field interaction with hydrocarbon flames //Ukr. J. Phys. – 2018. – Vol.63, № 5. – P. 402-405.

**Orlovskaya S.G.**

### **Experimental studies of evaporation of paraffin drops**

#### SUMMARY

*Paraffin is a low-melting material that can be used as an environmentally friendly and high-energy fuel. It can also be considered as a promising material with phase transitions capable of accumulating heat. It is known that the period of induction of ignition of paraffin droplets consists of successive stages, the main ones of which are melting and evaporation. The paper examines the processes of evaporation of octadecane and docosane droplets in air at different temperatures. A method of studying the kinetics of evaporation of paraffin fuel droplets using digital photography of the research object and computer image processing has been developed.*

*It is proved that the evaporation kinetics of the studied alkanes is described by the linear law of the change of the square of the diameter of the drop over time. Evaporation rate constants were found. There are no such data in the literature for these paraffins. The use of evaporation constants made it possible to find the time of complete evaporation of drops and to estimate the diffusion coefficient of paraffin vapor in air at different temperatures. As a result of the experiments, it was established that the rate of evaporation of octadecane is more than 4 times higher than the rate of evaporation of docosane. It was found that when the air tem-*

*perature reaches the specified values, the rate of evaporation of the specified alkanes increases significantly.*

**Key words:** *paraffins, alkanes, evaporation, evaporation constant, diffusion coefficient*

**Орловская С.Г.**

## **Экспериментальные исследования испарения капель парафинов**

### **АННОТАЦИЯ**

*В работе исследуются процессы испарения капель парафинов октадекана и доказана в воздухе при разных температурах. Разработана методика исследования кинетики испарения капель парафинового топлива с использованием цифровой съемки объекта исследования и компьютерной обработки изображений.*

*Доказано, что кинетика испарения капель изучаемых алканов описывается линейным законом изменения квадрата диаметра капли со временем. Оценены скорости испарения парафинов и найдены константы испарения. Такие данные в литературных источниках отсутствуют. Оценены времена полного испарения капель и найдены коэффициенты диффузии пара октадекана в воздухе при различных температурах. Установлено, что скорость испарения октадекана более чем в 4 раза выше скорости испарения доказана. Получено, что при достижении температурой воздуха определенных значений, константа испарения указанных алканов резко возрастает.*

**Ключевые слова:** *парафины, алканы, испарение, константа испарения, коэффициент диффузии.*