

УДК 536.46

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup1.15

С. Г. ОРЛОВСЬКА

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна

ВИВЧЕННЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ ПРИ СПАЛАХУВАННІ ТА ГОРІННІ ПАЛИВ НА ОСНОВІ ПАРАФІНІВ

Проведено дослідження кінетики фазових переходів при спалахуванні та горінні палива на основі парафіну для гібридних ракетних двигунів. Парафіни (суміш алканів) є перспективним ракетним паливом, яке відповідає екологічним і енергетичним вимогам. У світовій літературі наведено дані, що його використання як палива для гібридних двигунів може призвести до збільшення швидкості регресії в декілька разів. У даній роботі в якості **об'єкта** дослідження використовувався алкан – октадекан (чистий), насичений вуглеводень, хімічна формула якого $C_{18}H_{38}$. **Метою** роботи є вивчення кінетики плавлення та випаровування крапель октадекану в процесі спалахування й горіння та знаходження закономірностей впливу фазових переходів на характеристики високотемпературного тепломасообміну (період індукції, час і швидкість горіння). **Отримані результати.** У результаті експериментальних досліджень встановлено, що період індукції (час до моменту спалахування) складається з тривалості трьох послідовних стадій тепло-масообміну, які визначаються кінетикою фазових переходів 1 роду. На першій стадії нагрівання при температурах, близьких до температури плавлення парафіну, відбувається поліморфний перехід між його кристалічними структурами, що призводить до незначного зменшення ефективного діаметру частинки. Друга стадія – плавлення частинки, третя – випаровування рідкої фази та нагрівання пари до критичної температури, що визначає спалахування. Надалі відбувається горіння краплі, що визначається кінетикою взаємодії пари й окислювача та швидкістю випаровування краплі. Проведено вимірювання швидкості виникнення рідкої фази при плавленні частинки октадекану; доведено, що кінетика плавлення підпорядкована лінійному закону. Отримано, що тривалість стадії випаровування й нагрівання пари приблизно вдвічі менша за тривалість стадії плавлення. Визначено сталу горіння частинок октадекану та проведено розрахунки тривалості горіння крапель різного діаметра.

Ключові слова: тепломасообмін, фазові переходи, плавлення, випаровування, парафіни, октадекан, краплі, стала горіння.

Вступ

Сучасний розвиток аерокосмічної техніки характеризується зростаючим інтересом до гібридних ракетних двигунів (ГРД), які поєднують переваги твердопаливних і рідинних ракетних двигунів. Використання твердого палива та рідкого окисника забезпечує високий рівень експлуатаційної безпеки, можливість регулювання тяги, зупинки та повторного запуску двигуна, а також спрощує транспортування і зберігання пального [1–5]. Завдяки цим перевагам ГРД розглядаються як перспективні силові установки для метеорологічних і геофізичних ракет [5], суборбітальних апаратів, малих ракет-носіїв і багаторазових аерокосмічних систем.

Разом із тим, широке впровадження гібридних двигунів тривалий час стримувалося їхнім основним недоліком – низькою швидкістю регресії традиційних полімерних палив [3] насамперед гідроксил-термінованого полібутадієну (НТРВ). Невисока швидкість вигорання призводить до обмеження питомої тяги, необхідності використання складної багатоканальної геометрії паливного заряду та збільшення масогабаритних характеристик двигуна. Саме тому

одним із найактуальніших напрямів сучасних досліджень є пошук нових паливних композицій, здатних забезпечити інтенсивніше горіння без істотного ускладнення конструкції двигуна [5, 6].

Прорив у розвитку гібридних двигунів пов'язаний із роботами наукової школи Stanford University, в яких було запропоновано використовувати як тверде паливо парафінові композиції [6–8]. На відміну від традиційних полімерних палив, під час горіння парафін утворює тонку рідку плівку, з поверхні якої під дією високошвидкісного потоку окисника відриваються мікрокраплі розплаву. Це явище (*droplet entrainment*) суттєво інтенсифікує тепло- та масообмін у прикордонному шарі, що забезпечує збільшення швидкості регресії палива в 2–5 разів порівняно з НТРВ при збереженні високих енергетичних характеристик. Саме цей фізичний механізм сьогодні розглядається як головна перевага парафінових палив.

Подальші дослідження, виконані в наукових центрах Politecnico di Torino [1], DLR, JAXA, показали, що ефективність парафінових палив визначається не лише їхньою високою швидкістю регресії, але й комплексом фізико-хімічних властивостей, се-



ред яких особливе значення мають температура плавлення, в'язкість рідкої плівки, механічна міцність паливного заряду, інтенсивність краплеутворення та взаємодія з окисником. У зв'язку з цим сучасні дослідження спрямовані на створення модифікованих парафінових композицій із полімерними та енергетичними добавками [9-12], які забезпечують оптимальне поєднання балістичних характеристик і конструкційної міцності паливного заряду.

Попри значну кількість експериментальних і теоретичних робіт, фізичні механізми, що визначають інтенсивність горіння парафінових палив, залишаються недостатньо дослідженими. Особливо це стосується взаємозв'язку між процесами плавлення, випаровування, тепло- і масоперенесенням, утворенням крапель розплаву та кінетиною горіння нормальних алканів, які є основними компонентами технічних парафінів. Поглиблене вивчення цих процесів є необхідною умовою для створення фізично обґрунтованих моделей регресії палива та оптимізації характеристик гібридних ракетних двигунів. Метою роботи є вивчення кінетики плавлення та випаровування крапель парафіну в процесі спалахування й горіння

та знаходження закономірностей впливу фазових переходів на характеристики високотемпературного тепломасообміну. Для дослідження використовувався чистий алкан – октадекан ($C_{18}H_{38}$) з температурою плавлення $28,18^\circ C$.

Експериментальні дослідження

Для досліджень кінетики плавлення й горіння частинок чистих алканів було створено експериментальний стенд [13], на якому в режимі реального часу фіксувалось зображення частинки парафіну на всіх стадіях тепломасообміну з нагрітим газом включно з етапом горіння. У результаті обробки цифрових зображень частинки (а потім краплі) парафіну при нагріванні в повітрі було визначено її розмір. Спочатку визначалася площа частинки, а потім розраховувався ефективний діаметр. На рис. 1 надаються зображення зразка парафіну на різних етапах плавлення та при горінні, а на рис. 2 і рис. 3 – часові залежності ефективного діаметра частинки (потім краплі) при високих ($450^\circ C$) та низьких ($65^\circ C$) температурах оточуючого газу.



Рис.1.Цифрові зображення зразка парафіну на стадіях:
а - нагрівання; б, в – плавлення; г - горіння (блакитний колір – нижня межа полум'я).

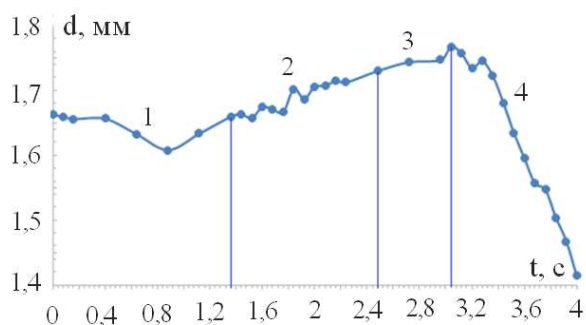


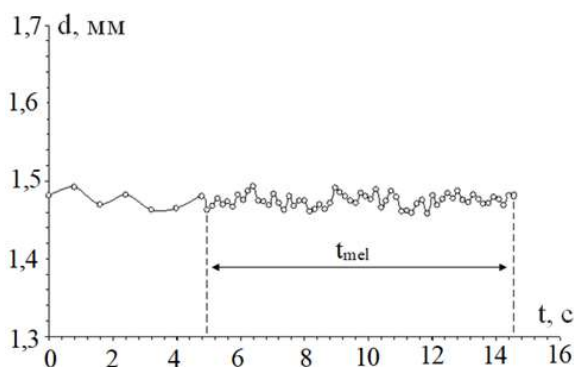
Рис.2. Залежність діаметра зразка октадекану з початковим діаметром $d_b = 1,64$ мм від часу при температурі газу $T_g = 450^\circ C$. Стадії:
1 – нагрівання твердої фази, 2 – плавлення частинки, 3 – випаровування і нагрівання пари, 4 – горіння краплі

На стадії нагрівання частинка розм'якшується й за температур, близьких до температури плавлення, спостерігається зменшення її ефективного діаметра до мінімального значення (рис. 2, стадія 1, рис. 3а). Це можна пояснити перебудовою триклинної кристалічної структури октадекану в гексагональну, яка характеризується більш щільною упаковкою речовини. Довго ланцюгові молекули набувають змогу обертатися навколо своїх довгих осей. Такий стан речовини називається ротаційно-кристалічним [14]. Згодом, на стадії плавлення видно повільне збільшення діаметра краплі внаслідок збільшення відстані між молекулами рідкої фази. На стадії 3 ефективний діаметр дещо зростає при зменшенні коефіцієнта поверхневого натягу рідини з ростом температури. На цій стадії відбувається нагрівання й випаровування краплі

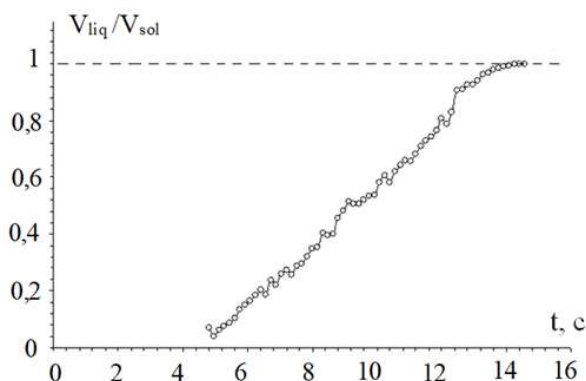
та нагрівання пари до температури займання в прикордонному шарі краплі.

На рис. 3б представлена часова залежність відносної частки розплаву в процесі плавлення частинки октадекану, розрахована при обробці цифрових зображень. Видно, що швидкість плавлення підпорядковується лінійному закону, за винятком прикінцевої

області плавлення. У кінці плавлення, коли рідка фаза практично заповнює весь об'єм зразка, відбувається більш інтенсивне випаровування рідини, яке йде з витратами тепла, тому швидкість плавлення дещо уповільнюється.



а



б

Рис. 3. Часові залежності діаметра (а) та відносної частки розплаву (б) частинки октадекану в процесі плавлення:

V_{liq}, V_{sol} – об'єми розплавленої фази та частинки, відповідно;
 $d_b = 1,48$ мм, $T_g = 65$ °С

Із рис. 1 випливає, що період індукції частинки парафіну t_{ind} (час, за який частинка спалахує) складається з трьох послідовних стадій тепломасообміну: 1 – нагрівання твердої фази (тривалістю $t_{h sol}$), 2 – плавлення частинки (тривалістю t_{mel}), 3 – нагрівання рідкої фази, її випаровування та нагрівання пари до температури спалахування (тривалістю $t_{h vap}$). У таблиці надано тривалості складових періоду індукції для частинок октадекану різного діаметра.

Таблиця 1

Тривалість стадій тепломасообміну перед спалахуванням частинки октадекану при $T_g = 450$ °С

d_b , мм	t_{ind} , с	$t_{h sol}$, с	t_{mel} , с	$t_{h vap}$, с
1,64	3,04	1,36	1,12	0,56
1,65	3,05	1,5	0,95	0,6
1,96	3,43	1,6	1,4	0,6

На всіх послідовних стадіях періоду індукції відбуваються фазові переходи 1 роду: на першій – поліморфний перехід зі зміною кристалічної структури алкану, на другій – плавлення, на третій – випаровування рідкої фази. Причому час протікання перших двох стадій відрізняється незначно (табл. 1), третя стадія – набагато коротша, а її тривалість практично

однакова для різних діаметрів. Четверта стадія, парофазне горіння, протікає в межах наведеної плівки та визначається кінетикою хімічної реакції між парою парафіну й окиснювачем та швидкістю випаровування краплі за температури горіння. Унаслідок вивчення кінетики зменшення діаметра крапель у процесі горіння отримано лінійний закон зміни квадрату діаметра краплі за часом (рис. 4), що вказує на дифузійний режим горіння: $d^2(t) = d_b^2 - K_{bur}t$, де K_{bur} – стала горіння.

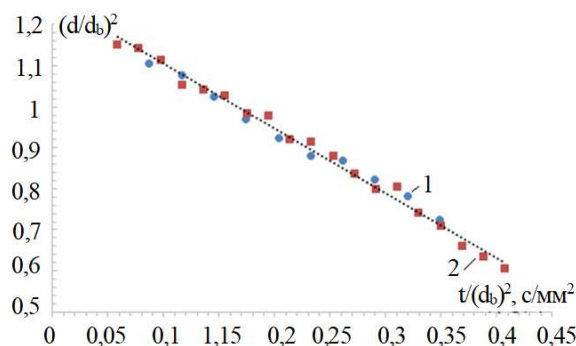


Рис. 4. Залежність $(d/d_b)^2$ від $t/(d_b)^2$ для крапель октадекану різних початкових діаметрів:

1 – $d_b = 1,64$ мм, 2 – $d_b = 1,96$ мм; $T_g = 450$ °С

Отримана експериментальним шляхом залежність $d^2=f(t)$ дала змогу визначити сталу горіння крапель октадекану, яка виявилася рівною $K_{bur} = 1,5 \text{ мм}^2/\text{с}$. Знаючи сталу горіння, можна оцінити тривалість горіння поодиноких крапель парафінового палива за формулою: $t_{bur} = d_b^2 / K_{bur}$. Для $d_b = 1,64 \text{ мм}$ отримано тривалість горіння $t_{bur} = 1,79 \text{ с}$, для $d_b = 1,96 \text{ мм}$ – $t_{bur} = 2,56 \text{ с}$.

Висновки

Дослідження процесів високотемпературного тепломасообміну частинок парафінового палива (октадекану) в нагрітому окислювальному газовому середовищі показали, що основні характеристики спалахування та горіння визначаються кінетикою фазових переходів 1 роду: плавленням і випаровуванням. На першій стадії нагрівання твердої фази відбувається поліморфний фазовий перехід між кристалічними структурами алкану. Дві наступні стадії – плавлення частинки й випаровування краплі з нагріванням пари до температури спалахування – завершують перехід до режиму горіння. Отримано, що тривалість стадії випаровування й нагрівання пари приблизно вдвічі менша за тривалість стадії плавлення. Визначено сталу горіння частинок октадекану та проведено розрахунки тривалості горіння крапель різного діаметра.

Конфлікт інтересів

Авторка заявляє, що не має конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Авторка підтверджує, що не використовувала методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Авторка прочитала та погодилася з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Casalino, L. *Hybrid Rocket Engine Design Optimization at Politecnico di Torino*:

A Review / L. Casalino, F. Masseni, D. G. Pastrone // *Aerospace*. - 2021.- Vol. 8, iss. 8. - 40 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace8080226>.

2. *Hybrid rocket engines: The benefits and prospects* / N. A. Davydenko, R. G. Gollender, A. M. Gubertov et al. // *Aerospace Science and Technology*. - 2007. - Vol. 11, iss. 1. - P. 55-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2006.08.008>.

3. Mazzetti, A. *Paraffin-based hybrid rocket engines applications: A review and a market perspective* / A. Mazzetti, L. Merotto, G. Inarello // *Acta Astronautica*. - 2016. - Vol. 126. - P. 286-297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.04.036>.

4. Oztan, C. *Utilization of additive manufacturing in hybrid rocket technology: A review* / C. Oztan, V. Coverstone // *Acta Astronautica*. - 2021. - Vol. 180. - P. 130-140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.11.024>.

5. Орехов, К. М. Підвищення ефективності метеорологічних ракет при застосуванні гібридних двигунів / К. М. Орехов // *Космічна наука і технологія*. - 2016. - Т. 22, № 2. - С. 52-59. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2016.02.052>.

6. Karabeyoglu, M. A. *Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory* / M. A. Karabeyoglu, D. Altman, B. J. Cantwell // *Journal of Propulsion and Power*. - 2002. - Vol. 18, iss. 3. - P. 610-618. DOI: <https://doi.org/10.2514/2.5975>.

7. Karabeyoglu, M. A. *Evaluation of Homologous Series of Normal Alkanes as Hybrid Rocket Fuels* / M. A. Karabeyoglu, B. J. Cantwell, J. Stevens // *Conference: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 10-13 July 2005, Tucson, Arizona*. - 12 p. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2005-3908>.

8. Chandler, A. *An investigation of liquefying hybrid rocket fuels with applications to solar system exploration* : PhD dissertation / A. Chandler / *Stanford University*. Stanford, 2012. - 182 p.

9. Ishigaki, T. *Improving Physical Properties of Wax-Based Fuels and Its Effect on Regression Rate* / T. Ishigaki, I. Nakagawa // *Journal of Propulsion and Power*. - 2019. - Vol. 36, iss. 1. - P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.B37613>.

10. *3D printed hybrid rocket fuels with μAl core-shell particles coated with polyvinylidene fluoride and polydopamine: Enhanced combustion characteristics* / Q. Chen, X. Fu, W. Yang et al. // *Defense Technology*. - 2025. - Vol. 46. - P. 59-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.12.002>.

11. Bisin, R. *A new strategy for the reinforcement of paraffin-based fuels based on cellular structures: The armored grain - Ballistic characterization* / R. Bisin, C. Paravan // *Acta Astronautica*. - 2023. - Vol. 206. - P. 284-298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.027>.

12. *Experimental investigation on thermal behavior and regression rate characteristics of paraffin-polyethylene wax blends as hybrid rocket fuels* / H. Tian, Y. Lu, L. Li et al. // *Acta Astronautica*. - 2025.- Vol. 236.-

P. 1073–1085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.07.056>.

13. Орловська, С. Г. Особливості перетворення палива на основі парафінів для гібридних двигунів / С. Г. Орловська // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. - 2025, № 4, спецвип. 1 (205). - С. 118-124. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2025.4sup1.15>.

14. Mukherjee, P. K. Phase transitions among the rotator phases of the normal alkanes: A review / P. K. Mukherjee. // *Physics Reports*. - 2015 - Vol. 588. - P. 1-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2015.05.005>.

References

1. Casalino, L., Masseni, F., Pastrone, D. G. Hybrid Rocket Engine Design Optimization at Politecnico di Torino: A Review. *Aerospace*, 2021, vol. 8, iss. 8. 40 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace8080226>.

2. Davydenko, N. A., Gollender, R. G., Gubertov, A. M., Mironov, V. V., Volkov, N. N. Hybrid rocket engines: The benefits and prospects. *Aerospace Science and Technology*, 2007, vol. 11, iss. 1, pp. 55-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2006.08.008>.

3. Mazzetti, A., Merotto, L., Pinarello, G. Paraffin-based hybrid rocket engines applications: A review and a market perspective. *Acta Astronautica*, 2016, vol. 126, pp. 286-297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.04.036>.

4. Oztan, C., Coverstone, V. Utilization of additive manufacturing in hybrid rocket technology: A review. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 180, pp. 130-140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.11.024>.

5. Oriekhov, K. M. Pidvyshchennia efektyvnosti meteorolohichnykh raket pry zastosuvanni hibrydnykh dvyhuniv [Increasing the efficiency of meteorological rockets using hybrid engines]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia – Space science and technology*, 2016, vol. 22, iss. 2, pp. 52-59. (In Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.15407/knit.2016.02.052>.

6. Karabeyoglu, M. A., Altman, D., Cantwell, B. J. Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory. *Journal of Propulsion and Power*, 2002, vol. 18, iss. 3, pp. 610-618. DOI: <https://doi.org/10.2514/2.5975>.

7. Karabeyoglu, M. A., Cantwell, B. J., Stevens, J. Evaluation of Homologous Series of Normal Alkanes as Hybrid Rocket Fuels. *Conference: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 10-13 July 2005, Tucson, Arizona. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2005-3908>.

8. Chandler, A. An investigation of liquefying hybrid rocket fuels with applications to solar system exploration. PhD thesis. Stanford, Stanford University, 2012. 182 p.

9. Ishigaki, T., Nakagawa, I. Improving Physical Properties of Wax-Based Fuels and Its Effect on Regression Rate. *Journal of Propulsion and Power*, 2019, vol. 36, iss. 1, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.B37613>.

10. Chen, Q., Fu, X., Yang, W., Chen, S., Guo, Z., Hu, R., Zhang, H., Cui, L., Xia, X. 3D printed hybrid rocket fuels with μAl core-shell particles coated with polyvinylidene fluoride and polydopamine: Enhanced combustion characteristics. *Defence Technology*, 2025, vol. 46, pp. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.12.002>.

11. Bisin, R., Paravan, C. A new strategy for the reinforcement of paraffin-based fuels based on cellular structures: The armored grain - Ballistic characterization. *Acta Astronautica*, 2023, vol. 206, pp. 284–298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.027>.

12. Tian, H., Lu, Y., Li, L., Chen, R., Niu, X., Zhang, Y., Cai, G. Experimental investigation on thermal behavior and regression rate characteristics of paraffin-polyethylene wax blends as hybrid rocket fuels. *Acta Astronautica*, 2025, vol. 236, pp. 1073–1085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.07.056>.

13. Orlovska, S. G. Osoblyvosti peretvorennia palyva na osnovi parafiniv dlia hibrydnykh dvyhuniv. [Features of converting paraffin-based fuels for hybrid engines]. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia – Aerospace Technic and Technology*, 2025, no. 4, sup 1 (205), pp. 118-124. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2025.4sup1.15>.

14. Mukherjee, P. K. Phase transitions among the rotator phases of the normal alkanes: A review. *Physics Reports*, 2015, vol. 588, P. 1-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2015.05.005>.

Надійшла до редакції 15.06.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 29.07.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 03.09.2026

STUDY OF PHASE TRANSITIONS DURING FLASHING AND COMBUSTION OF PARAFFIN-BASED FUELS

Svitlana Orlovska

The kinetics of phase transitions during the ignition and combustion of a paraffin-based fuel for hybrid rocket engines was investigated. Paraffins (a mixture of alkanes) are a promising rocket fuel that meets environmental and energy requirements. Global literature reports that their use as fuel for hybrid engines can increase the regression rate several-fold. In this study, pure octadecane, a saturated hydrocarbon with the chemical formula $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$, was used as the research object. The aim of this work is to study the kinetics of melting and evaporation of octadecane

droplets during ignition and combustion, and to establish the patterns of phase transition effects on high-temperature heat and mass transfer characteristics (induction period, combustion time, and combustion rate). **Results.** As a result of experimental studies, it was established that the induction period (time until ignition) comprises the durations of three consecutive heat- and mass-transfer stages, determined by the kinetics of first-order phase transitions. In the first heating stage, at temperatures near the melting point of paraffin, a polymorphic transition between its crystalline structures occurs, resulting in a slight decrease in the effective particle diameter. The second stage is particle melting, and the third stage is liquid phase evaporation and vapor heating to a critical temperature that determines ignition. Subsequently, droplet combustion occurs, governed by the kinetics of vapor-oxidizer interaction and the droplet evaporation rate. The rate of liquid-phase formation during the melting of the octadecane particle was measured, demonstrating that the melting kinetics follow a linear law. It was found that the evaporation and vapor heating stage lasts approximately half as long as the melting stage. The combustion constant for octadecane particles was determined, and calculations of the combustion time for droplets of various diameters were performed.

Keywords: heat and mass transfer, phase transitions, melting, evaporation, paraffins, octadecane, droplets, combustion constant.

Орловська Світлана Георгіївна – канд. фіз. мат. наук, доцент кафедри фізики та астрономії, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна.

Svitlana Orlovska – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Associate Professor at the Department of Physics and Astronomy, Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine.
e-mail: svetor25@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1203-6978.