



*А. Я. Здобицький, Л. С. Шипот, А. М. Домінік*

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8044-9593> – А. Я. Здобицький

<https://orcid.org/0000-0002-3436-1547> – Л. С. Шипот

<https://orcid.org/0000-0003-0139-2002> – А. М. Домінік



lubomyr.roket@gmail.com

## ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ТЕРМОСТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙ БПЛА В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

**Проблема** Безпілотні літальні апарати пожежного призначення працюють в умовах дії високотемпературних теплових потоків, що призводять до інтенсивного нестационарного нагрівання їхніх конструкційних елементів. У зоні відкритого полум'я теплові потоки формують температури 250–400 °С і вище, що призводить до інтенсивної температурно-часової деградації полімерної матриці та швидкого зниження несучої здатності композитів. Існуючі підходи до оцінювання термостійкості матеріалів переважно ґрунтуються на граничних температурах і не враховують тривалість теплового впливу в реальних пожежних умовах. Це унеможливило обґрунтований вибір матеріалу для конструкцій пожежних БПЛА та потребує застосування нестационарного моделювання теплообміну.

**Мета** Полягає у науково-обґрунтованому виборі оптимального термостійкого композитного матеріалу для конструкції БПЛА шляхом математичного моделювання впливу нестационарного температурного впливу та аналізу температурно-часової деградації механічних властивостей композитів за умов інтенсивного пожежного теплового впливу.

**Методи дослідження.** Застосовано методи математичного моделювання процесів теплообміну в шаруватих структурах та кінетичний аналіз термодеструкції полімерних композитів з метою визначення температурно-часових меж їхньої працездатності в умовах пожежі.

Температурний стан конструкційних елементів БПЛА визначався шляхом розв'язання рівняння теплопровідності з урахуванням теплообміну на поверхні матеріалу. Чисельну реалізацію розробленої моделі виконано в системі комп'ютерної алгебри із використанням прямого методу дослідження процесу теплообміну в шаруватих конструкціях.

**Основні результати дослідження.** Чисельним моделюванням встановлено залежність температурно-часової деградації міцності композитів від типу полімерної матриці. Показано, що композит CFRP-EP втрачає понад 50 % початкової міцності вже за 70 с при температурі 200 °С, тоді як CFRP-BMI зберігає працездатність до 150 с при 250 °С. Найвищу термостійкість продемонстрували композити CF/PEEK та CF/PEKK, які зберігають 60–75 % початкової міцності за температур 280–300 °С протягом 200–300 с, що підтверджує їхню придатність для роботи в умовах підвищеного теплового навантаження.

**Висновки.** На основі математичного моделювання процесу теплообміну встановлено визначальний вплив типу полімерної матриці на температурно-часову працездатність композитів конструкції пожежного БПЛА. Показано, що епоксидні вуглепластики швидко втрачають несучу здатність за температур 180–200 °С, тоді як композити класу PAEK (PEEK, PEKK) зберігають 60–75 % початкової міцності за температур 280–300 °С протягом 200–300 с. Нижча теплопровідність матриці PEKK забезпечує повільніше зростання температури в товщі матеріалу. Отримані результати обґрунтовують доцільність застосування композитів CF/PEEK та CF/PEKK у конструкціях пожежних безпілотних літальних апаратів.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат; композитні матеріали; термостійкість; теплообмін; нестационарне температурне поле; математичне моделювання; пожежогасіння; PEEK; PEKK.

## OPERATION OF UNMANNED AIRCRAFT IN FIRE CONDITIONS

**Problem.** Firefighting unmanned aerial vehicles (UAVs) operate under conditions of intense high-temperature thermal exposure, which leads to pronounced unsteady heating of their structural components. In the vicinity of open flames, thermal loads generate temperatures of 250–400 °C and higher, resulting in temperature–time-dependent degradation of the polymer matrix and a rapid reduction in the load-bearing capacity of composite materials. Existing approaches to evaluating the thermal resistance of structural materials are predominantly based on limiting temperatures and do not adequately account for the duration of thermal exposure under real fire conditions. This limits the reliability of material selection for firefighting UAV structures and necessitates the application of unsteady heat exchange modeling.

**Purpose.** The purpose of this study is to scientifically substantiate the selection of an optimal heat-resistant composite material for the structure of a firefighting unmanned aerial vehicle through mathematical modeling of the influence of non-stationary temperature and analysis of temperature–time-dependent degradation of mechanical properties under intense fire thermal loads.

**Research Methods.** The study used methods of unsteady mathematical modeling of heat transfer processes in layered structures with kinetic analysis of thermal degradation of polymer-based composites in order to determine their temperature–time operational limits under fire exposure.

The thermal state of UAV structural elements was determined by solving the heat conduction equation with consideration of convective and radiative heat exchange at the material surface. Numerical implementation of the developed model was carried out in the computer algebra system environment using the direct method of studying the heat transfer process in layered structures.

**Main Results.** Numerical simulations revealed a pronounced dependence of temperature–time strength degradation on the type of polymer matrix. It was established that the CFRP-EP composite loses more than 50% of its initial strength within 70 s at a temperature of 200 °C, indicating limited applicability in firefighting environments. The CFRP-BMI composite maintains operational capability for up to 150 s at 250 °C but undergoes significant degradation under prolonged thermal exposure.

The highest thermal resistance was demonstrated by CF/PEEK and CF/PEKK composites, which retain 60–75% of their initial strength at temperatures of 280–300 °C for durations of 200–300 s. These results confirm their suitability for operation under elevated fire-induced thermal loads.

**Conclusions.** Unsteady heat and mathematical modeling of unsteady heat transfer processes has established the decisive influence of the polymer matrix type on the temperature–time performance of composite materials used in firefighting UAV structures. Epoxy-based carbon fiber composites rapidly lose load-bearing capacity at temperatures of 180–200 °C, whereas PAEK-class composites (PEEK, PEKK) retain 60–75% of their initial strength at temperatures of 280–300 °C for a duration of 200–300 s. The lower thermal conductivity of the PEKK matrix results in a slower temperature rise through the material thickness, extending structural survivability. The obtained results substantiate the feasibility of using CF/PEEK and CF/PEKK composites in the structural elements of firefighting unmanned aerial vehicles.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; composite materials; thermal resistance; heat exchange; non-stationary temperature field; mathematical modeling; firefighting; PEEK; PEKK.

**Вступ.** Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) дедалі активніше застосовуються як ефективний інструмент пожежної розвідки та оперативного реагування на надзвичайні ситуації. Їхні ключові переваги — висока маневреність, швидкість розгортання, можливість тривалого моніторингу зони пожежі та виконання завдань у середовищах, небезпечних або недоступних для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів.

Разом із тим конструкційні елементи апарата піддаються дії екстремальних теплових навантажень, характерних для зон активного горіння: температури 250–500 °C, інтенсивне інфрачервоне випромінювання, конвекційні та радіаційні теплові потоки, а також різкі градієнти температур на поверхні та в товщі матеріалу. За таких умов визначальним чинником працездатності БПЛА є не стільки номінальна

термостійкість матеріалу, скільки його температурно-часова витривалість, тобто здатність зберігати механічні властивості впродовж певного часу при дії підвищених температур.

Більшість серійних платформ БПЛА виготовлені з традиційних вуглепластиків на основі епоксидної матриці, критична температура склування яких ( $\approx 120\text{--}180$  °C) істотно нижча від температур, що спостерігаються поблизу відкритого полум'я. Це призводить до швидкої втрати жорсткості та міцності в умовах пожежі. Тому виникає завдання науково обґрунтованого вибору композиту, який би забезпечував тривале збереження структурної цілісності за умов інтенсивного теплового впливу.

**Постановка проблеми.** У сучасних дослідженнях композитних матеріалів значна увага приділяється їх поведінці в умовах високих температур та пожежного впливу. Зокрема, у

роботах [1–4] досліджено процеси термічної деградації полімерних композитів, визначено температурні межі втрати міцності та механізми руйнування матеріалу.

Питання теплообміну та теплопровідності композитів у нестационарних умовах розглянуті у працях [5, 8], де показано суттєвий вплив теплофізичних властивостей матеріалу на швидкість прогріву конструкцій.

У роботах [6, 7, 10] досліджено механізми термодеструкції та вогнестійкості полімерних матриць, а також вплив температури на їхні механічні характеристики. Зокрема, встановлено, що композити на основі високотемпературних полімерів мають значно кращу термостійкість.

Однак в умовах сьогодення дедалі частіше застосовують полімери типу РАЕК, зокрема РЕЕК і РЕКК, як перспективні матриці для термостійких композитів. У праці [6] показано, що композити на основі РЕЕК і РЕКК демонструють підвищену термоокисну стабільність, вищі температури початку деградації та повільнішу втрату механічних властивостей порівняно з епоксидними системами. Додатково у науковій роботі [18] досліджено застосування полімерних композитів у транспортних системах, що підтверджує актуальність використання таких матеріалів у конструкціях БпЛА.

Таким чином, аналіз наявних публікацій свідчить про відсутність комплексних досліджень, спрямованих на оцінювання температурно-часової працездатності композитів у БпЛА з урахуванням реальних теплових впливів в умовах пожежі. Це обумовлює необхідність застосування методів моделювання процесів теплообміну для науково обґрунтованого вибору термостійких композитних матеріалів, що й зумовлює актуальність цієї роботи.

Ефективність застосування БпЛА в умовах пожежі істотно обмежується термостійкістю матеріалів, з яких виготовлено їхні конструкційні елементи. У зоні відкритого полум'я температура повітря та теплового випромінювання може сягати 250–400 °С, а інколи й перевищувати ці значення. За таких умов ключовим є не лише рівень максимальної температури, а й тривалість теплового впливу, яка визначає швидкість деградації полімерної матриці та зниження несучої здатності композиту.

**Проблема полягає у визначенні такого композитного матеріалу, який би забезпечував:**

- стійкість до температур 250 – 400°С протягом 60 – 300 с;
- мінімальну деградацію механічних властивостей під час теплового впливу пожежі;

- невелику масу, необхідну для льотно-технічної ефективності БпЛА;

- технологічність та можливість виготовлення складних просторових елементів конструкції.

Розв'язання зазначеної проблеми вимагає науково обґрунтованого підходу, що поєднує моделювання процесів теплообміну з використанням системи комп'ютерної алгебри та кінетичні моделі термодеструкції полімерної матриці, які дають змогу оцінити часові масштаби втрати міцності композитів в умовах пожежі.

Розв'язок цієї задачі потребує визначення розподілу нестационарного температурного поля по товщині корпусу БпЛА, яке дає змогу визначити реальні температурно-часові профілі нагрівання в матеріалі та оцінити їх вплив на деградацію механічних властивостей.

**Методи дослідження.** Для опису процесів теплообміну та деградації композитних матеріалів застосовуються аналітичні та чисельні методи. У роботах [13–17] розглянуто моделі поширення температурних полів та розвитку пожежі у складних інженерних системах.

Зокрема, у [14–16] наведено підходи до чисельного моделювання пожеж у будівлях, а у [17] методи оцінювання вогнестійкості конструкцій.

Методи оптимізації конструкцій та параметрів композитних систем, що застосовуються у сучасному машинобудуванні, наведені у [11, 12], що дозволяє враховувати конструктивні обмеження при проектуванні.

Сучасні дослідження структури композитів, зокрема формування контактних зон та вплив складу матриці, наведені у [19], що підтверджує залежність теплофізичних характеристик від внутрішньої структури матеріалу.

У межах цієї роботи застосовано комплексну методику, яка охоплює два послідовні етапи:

1. Математичне моделювання процесу теплообміну в елементах конструкції БпЛА з використанням прямого методу дослідження температурного поля в багатопарових конструкціях та його чисельної реалізації у середовищі системи комп'ютерної алгебри. Це дозволило визначити динаміку температурних полів у матеріалі для заданих режимів пожежного навантаження.

2. Оцінювання температурно-часової деградації механічних властивостей композиту на основі кінетичних моделей термодеструкції полімерної матриці.

Для чисельного моделювання було відібрано полімерні матеріали, які найчастіше застосовуються у високотемпературних композитах або розглядаються як перспективні для пожежних БпЛА. Їхні основні теплофізичні характеристики наведено в таблиці.

Фізико-технічні характеристики полімерних матеріалів

Матеріал	Теплопровідність $\lambda$ , Вт/(м·К)	Питома теплоємність $c$ , Дж/(кг·К)	Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Температура деградації, °С
Фенольні смоли	0,20–0,25	920–1400	1130–1350	≈300 (обвуглювання)
РЕЕК	≈0,25	1340–2200	1310–1320	343
РЕЕК/РАЕК	≈0,25	≈1340	1300–1320	350
PPS	≈0,30	1090	1340–1360	280
PEI	≈0,22	1125	1270	217
Епоксидні смоли	0,20–0,30	≈1000	1100–1200	110–180

Наведені дані свідчать, що при близьких значеннях коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  вирішальними чинниками термостійкості є питома теплоємність та температура початку деградації полімерної матриці, що безпосередньо впливає на допустимий час експлуатації конструкції в умовах пожежного теплового впливу.

#### Математична модель теплопереносу

Моделювання теплового стану конструкційних елементів пожежного БПЛА виконувалося за таких припущень:

- матеріал вважається однорідним у межах розрахункового шару;
- теплофізичні властивості ( $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$ ) залежать від типу полімерної матриці та приймаються сталими в межах окремих температурних інтервалів;
- тепловий вплив пожежі є нестационарним, але для фіксованої потужності полум'я вважається квазісталім у часі;
- домінуючий теплообмін відбувається в напрямку, перпендикулярному до поверхні матеріалу, що дозволяє застосувати одновимірну постановку задачі.

#### Диференціальне рівняння теплопровідності

Зміна нестационарного температурного поля в матеріалі описується диференціальним рівнянням теплопровідності [5, 13, 14]:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (1)$$

де  $t$  – температура в точці з координатою  $x$  у момент часу  $\tau$ ;

$\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – питома масова теплоємність, Дж/(кг·К);

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

#### Початкові та крайові умови

Вважатимемо, що матеріал товщиною 3 мм має рівномірну температуру навколишнього середовища:

$$t(x, 0) = t_0 \quad (2)$$

де  $t_0 = 20$  °С.

Крайові умови формулюються у вигляді умов другого та третього роду. На поверхні матеріалу, що нагрівається ( $x = 0$ ), задається густина теплового потоку  $q_0$ , що моделює тепловий вплив пожежного полум'я:

$$\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = q_0 \quad (3)$$

На протилежній поверхні ( $x = l$ ) здійснюється теплообмін із навколишнім середовищем за законом Ньютона-Ріхмана:

$$\lambda \frac{\partial t(l, \tau)}{\partial x} = \alpha (t_{nc} - t(l, \tau)), \quad (4)$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_{nc}$  – температура навколишнього середовища.

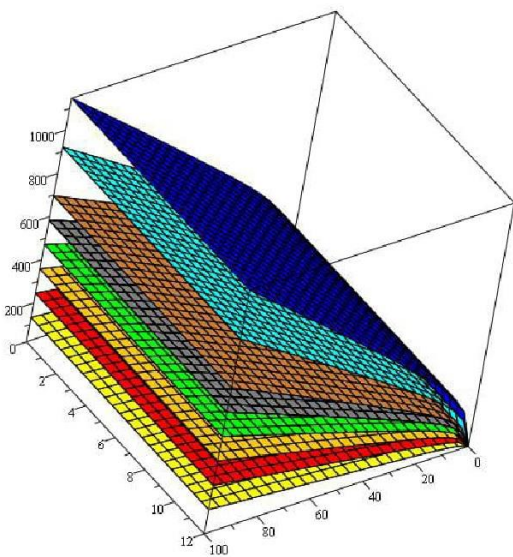
Зазначена система крайових умов дозволяє одночасно врахувати інтенсивність теплового випромінювання від пожежі та процес відведення тепла з необігріваної поверхні конструкційного елемента.

Інтенсивність густини теплового потоку, що діє на поверхню матеріалу, приймалася в діапазоні 5–50 кВт/м<sup>2</sup>, що відповідає характерним рівням теплового випромінювання в осередку пожежі. Розв'язання задачі теплопровідності з урахуванням початкової і крайових умов дає змогу визначити часову залежність температурного поля в матеріалі та, відповідно, встановити гранично допустимий час перебування БПЛА в зоні дії пожежі залежно від типу конструкційного матеріалу.

**Результати та обговорення.** У середовищі системи комп'ютерної алгебри здійснено чисельну реалізацію розв'язку диференціального рівняння теплопровідності (1) з урахуванням початкової умови (2) та крайових умов (3), (4). На основі отриманого розв'язку визначено часову зміну температурного поля в конструкційних елементах пожежного БПЛА для різних типів полімерних матриць. Граничний стан матеріалу визначався досягненням температури початку

термодеструкції або втратою несучої здатності відповідно до фізико-технічних характеристик розглянутих матеріалів.

На рис. 1 наведено залежності максимального допустимого часу перебування  $t_{\max}$  досліджуваного об'єкта від висоти його розташування над осередком пожежі для матеріалу РЕЕК при різних потужностях полум'я. Отримані результати мають монотонно зростаючий характер, що зумовлено зменшенням густини теплового потоку  $q_0$ , який діє на поверхню матеріалу зі збільшенням відстані до джерела полум'я. Така поведінка безпосередньо впливає з крайової умови (3), у якій інтенсивність теплового навантаження визначає швидкість росту температури в приповерхневих шарах матеріалу.

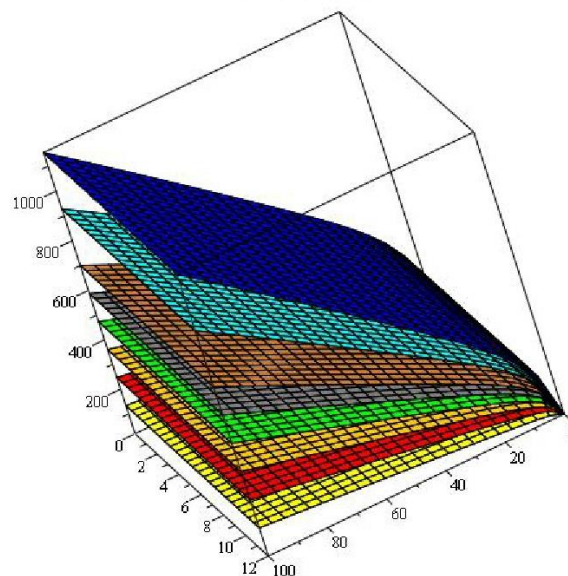


**Рисунок 1** – Висотно-часові характеристики термостійкості матеріалів РЕЕК

Аналіз залежностей, наведених на рис. 1, свідчить про те, що максимальні значення допустимого часу нагрівання  $t_{\max}$  притаманні матеріалам на основі термопластів сімейства РАЕК (зокрема РЕЕК та РЕЕК/РАЕК-композицій). Це зумовлено їхніми теплофізичними властивостями — насамперед підвищеною питомою теплоємністю та високою температурою початку термічної деградації, — що забезпечує більш повільне зростання температури в об'ємі матеріалу відповідно до рівняння (1).

На рис. 2 представлено залежності максимального допустимого часу нагрівання  $t_{\max}$  від потужності пожежного полум'я в діапазоні 5–50 кВт. Для всіх досліджуваних матеріалів спостерігається різке зменшення  $t_{\max}$  зі зростанням потужності теплового джерела, що є прямим наслідком збільшення густини теплового потоку  $q_0$  у крайовій умові (3). При цьому порядок розташування кривих для різних матеріалів зберігається в усьому діапазоні навантажень,

що свідчить про домінуючий вплив власних теплофізичних характеристик матеріалу, а не лише інтенсивності зовнішнього теплового впливу.



**Рисунок 2** – Висотно-часові характеристики термостійкості матеріалів РЕЕК/РАЕК

### Висновки

У роботі досліджено нестационарний тепловий вплив на стан композитних матеріалів, що застосовуються в конструкціях пожежних БПЛА, за умов інтенсивного теплового навантаження, характерного для зон відкритого полум'я. Отримані результати підтверджують ефективність застосування математичного моделювання процесів теплообміну з урахуванням конвективного теплообміну на поверхні матеріалу.

Математичну модель сформульовано в одновимірній постановці на основі диференціального рівняння теплопровідності з крайовими умовами другого та третього роду для діапазону густини теплового потоку 5–50 кВт/м<sup>2</sup>. Чисельну реалізацію виконано в системі комп'ютерної алгебри, що дозволило визначити часову залежність температурного поля та встановити гранично допустимий час перебування матеріалів у зоні пожежного впливу до досягнення температури термодеструкції полімерної матриці.

Найбільш сприятливі температурно-часові характеристики встановлено для композитів класу РАЕК. Матеріали на основі РЕЕК та РЕЕК/РАЕК зберігають працездатний стан понад 350–370 с, при цьому максимальна температура не перевищує  $\approx 360$ – $380$  °С навіть за підвищених теплових навантажень. Зі зменшенням висоти зависання БПЛА над осередком пожежі з 1,0 м до 0,25–0,35 м допустимий час перебування скорочується у 3–5 разів для всіх матеріалів,

однак композити класу ПАЕК зберігають працездатність упродовж 25–35 с

Таким чином, чисельне моделювання теплообміну в середовищі системи комп'ютерної алгебри дозволило обґрунтовано визначити температурно-часові межі працездатності композитних матеріалів і підтвердити доцільність використання композитів класу ПАЕК (PEEK/PEKK) як базових конструкційних матеріалів пожежних безпілотних літальних апаратів.

#### Список літератури:

1. Mouritz A. P. Review of fire structural modelling of polymer composites. *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 80. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.11.002>
2. Keller T., Dixit A. High-temperature performance of FRP composites. *Composite Structures*. 2020. Vol. 239. Article 112019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112019>
3. Chen Y., Zhao J., Liang S. Time–temperature dependent degradation of thermoplastic composites. *Materials & Design*. 2022. Vol. 213. Article 110303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110303>
4. Wu C., Li Y., Yang F. Thermal degradation behavior of PEEK. *Polymer Degradation and Stability*. 2021. Article 109643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109643>
5. Fang Z., Liu Q., Zhou B. Unsteady heat transfer modelling in composite shells. *International Journal of Thermal Sciences*. 2022. Vol. 180. Article 107678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107678>
6. Kumar A., Singh P., Rana R. Thermal fatigue of fiber-reinforced thermoplastics. *Journal of Composite Science*. 2021. Vol. 5, № 6. Article 150. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs5060150>
7. Feih S., Mouritz A. P. Tensile properties of carbon fibre–polymer composites in fire. *Composites Part A*. 2012. Vol. 43. P. 765–772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.01.023>
8. Gibson A. G. Fire behaviour of polymer composites. *Composites Part A*. 2010. Vol. 41. P. 173–181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.10.006>
9. Mouritz A. P., Gibson A. G. *Fire Properties of Polymer Composite Materials*. Dordrecht: Springer, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5356-6>
10. Kandola B., Horrocks A. Flame retardant polymeric materials. *Polymer Degradation and Stability*. 2020. Article 109369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109369>
11. Zdobytskyi A., Klymkovych T., Seniv H., Lobur M., Kernyskyy A., Tsymbrylo S. Optimization of Parameters of Nanocomposite Hip Implants. *2021 IEEE XVIIth International Conference on the*

*Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*. Polyana, Ukraine, 2021. P. 134–137. DOI:

<https://doi.org/10.1109/MEMSTECH53091.2021.9467914>

12. Trochimczuk R., Zdobytskyi A., Borkowski P. The Use of Generative Design Methods to Reduce the Parameters of an Actuator Used in the Positioning System of a Continuous Passive Motion (CPM) Device. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 8. Article 3477. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14083477>

13. Тацій Р., Пазен О. Прямий метод розрахунку нестационарного температурного поля за умов пожежі. *Пожежна безпека*. 2015. № 26. С. 156–166.

14. Яковчук Р. С., Балло Я. В., Кузик А. Д. Моделювання поширення пожежі фасадними системами з використанням FDS. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2021. № 23. С. 39–45.

15. Кузик А. Д., Яковчук Р. С. Чисельне моделювання розвитку пожеж у будівлях складної конфігурації. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2019. № 21. С. 52–58.

16. Тищенко О. М., Костирка О. В. Дослідження впливу конструктивних параметрів огорожувальних конструкцій на розвиток пожежі. *Науковий вісник НУЦЗ України*. 2022. № 2(36). С. 118–125.

17. Ніжник В. В., Балло Я. В. Аналіз сучасних методів оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій. *Пожежна безпека*. 2018. № 33. С. 45–52.

18. Jagadeesh P., Puttegowda M., Rangappa S. M., Siengchin S. Role of polymer composites in railway sector: an overview. *Applied Science and Engineering Progress*. 2022. Vol. 15, № 2. Article 5745. DOI:

<https://doi.org/10.14416/j.asep.2022.02.005>

19. Shtapenko E. P., Syrovatko Y. V., Levkovich O. O. Formation of contact interaction zones during infiltration of composite materials depending on binder composition. *Chemistry, Physics and Technology of Surface*. 2025. Vol. 16, № 1. P. 75–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/hftp16.01.075>

#### References:

1. Mouritz, A. P. (2016). Review of fire structural modelling of polymer composites. *Fire Safety Journal*, 80, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.11.002>
2. Keller, T., & Dixit, A. (2020). High-temperature performance of FRP composites. *Composite Structures*, 239, 112019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112019>
3. Chen, Y., Zhao, J., & Liang, S. (2022). Time–temperature dependent degradation of thermoplastic

- composites. *Materials & Design*, 213, 110303. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110303>
4. Wu, C., Li, Y., & Yang, F. (2021). Thermal degradation behavior of PEEK. *Polymer Degradation and Stability*. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109643>
5. Fang, Z., Liu, Q., & Zhou, B. (2022). Unsteady heat transfer modelling in composite shells. *International Journal of Thermal Sciences*, 180, 107678. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107678>
6. Kumar, A., Singh, P., & Rana, R. (2021). Thermal fatigue of fiber-reinforced thermoplastics. *Journal of Composite Science*, 5(6), 150. <https://doi.org/10.3390/jcs5060150>
7. Feih, S., & Mouritz, A. P. (2012). Tensile properties of carbon fibre–polymer composites in fire. *Composites Part A*, 43, 765–772. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.01.023>
8. Gibson, A. G. (2010). Fire behaviour of polymer composites. *Composites Part A*, 41, 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.10.006>
9. Mouritz, A. P., & Gibson, A. G. (2006). *Fire properties of polymer composite materials*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5356-6>
10. Kandola, B., & Horrocks, A. (2020). Flame retardant polymeric materials. *Polymer Degradation and Stability*. [doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109369](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109369)
11. Zdobytskyi, A., Klymkovych, T., Seniv, H., Lobur, M., Kernyskyi, A., & Tymbrylo, S. (2021). Optimization of parameters of nanocomposite hip implants. *MEMSTECH* 2021. [doi.org/10.1109/MEMSTECH53091.2021.9467914](https://doi.org/10.1109/MEMSTECH53091.2021.9467914).
12. Trochimczuk, R., Zdobytskyi, A., & Borkowski, P. (2024). The use of generative design methods to reduce the parameters of an actuator used in the positioning system of a continuous passive motion (CPM) device. *Applied Sciences*, 14(8), 3477. <https://doi.org/10.3390/app14083477>.
13. Tatsii, R., & Pazen, O. (2015). Pryamyi metod rozrakhunku nestatsionarnoho temperaturnoho polya za umov pozhezhi [Direct method for calculating non-stationary temperature field under fire conditions]. *Pozhezhna bezpeka*, 26, 156–166 [in Ukrainian].
14. Yakovchuk, R. S., Ballo, Y. V., & Kuzyk, A. D. (2021). Modelyuvannya poshyrennya pozhezhi fasadnykh systemamy z vykorystanniam FDS [Modeling of fire spread in facade systems using FDS]. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*, 23, 39–45 [in Ukrainian].
15. Kuzyk, A. D., & Yakovchuk, R. S. (2019). Chysel'ne modelyuvannya rozvytku pozhezhu u budivlyakh skladnoyi konfihuratsiyi [Numerical modeling of fire development in buildings]. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*, 21, 52–58 [in Ukrainian].
16. Tyshchenko, O. M., & Kostyrka, O. V. (2022). Doslidzhennya vplyvu konstruktyvnykh parametriv ohorodzhuval'nykh konstruktsiy na rozvytok pozhezhu [Influence of building structures on fire development]. *Naukovyi visnyk NUTsZU Ukrainy*, 2(36), 118–125 [in Ukrainian].
17. Nizhnyk, V. V., & Ballo, Y. V. (2018). Analiz suchasnykh metodiv otsinyuvannya vohnestiykosti budivel'nykh konstruktsiy [Methods of fire resistance evaluation]. *Pozhezhna bezpeka*, 33, 45–52 [in Ukrainian].
18. Jagadeesh, P., Puttegowda, M., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2022). Role of polymer composites in railway sector: An overview. *Applied Science and Engineering Progress*, 15(2), 5745. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2022.02.005>
19. Shtapenko, E. P., Syrovatko, Y. V., & Levkovich, O. O. (2025). Formation of contact interaction zones during infiltration of composite materials depending on binder composition. *Chemistry, Physics and Technology of Surface*, 16(1), 75–82. <https://doi.org/10.15407/hftp16.01.075>

© А. Я. Здобицький, Л. С. Шипот,  
А. М. Домінік, 2026.

**Науково-методична стаття.**

Надійшла до редакції 27.03.2026.

Прийнята до друку 29.04.2026.

Опублікована 25.05.2026.