

УДК 536.24

к. т. н. Борис Рассамакін,

bmrass@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8097-3678

аспірант Костянтин Половинкін,

tech.polovinkin@gmail.com, ORCID: 0009-0006-0227-3346

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.42-54>

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ СИСТЕМ СКЛАДНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗА ДІЇ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОМЕНЕВИХ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ

Анотація. У роботі наведено результати чисельного моделювання теплового стану системи складної конструкції за умов впливу нестационарних променевих теплових потоків та змінних внутрішніх теплових навантажень. Дослідження орієнтоване на аналіз перехідних теплових процесів, температурних коливань і пікових значень температури за циклічного зовнішнього опромінення та змінного в часі тепловиділення. Об'єктом дослідження з жорсткими габаритними й енергетичними обмеженнями обрано університетський наносупутник PolyITAN-3-PUT формату 3U на низькій навколосезній орбіті. Теплова модель побудована з урахуванням геометрії конструкції, термооптичних властивостей зовнішніх поверхонь, умов орбітального освітлення та часових профілів тепловиділення бортової апаратури. У межах дослідження отримано часові залежності температури ключових елементів конструкції, проаналізовано встановлення квазістационарного теплового режиму та характер температурних коливань при зміні режимів роботи, з акцентом на динамічну теплову реакцію електронних компонентів на імпульсні навантаження. Отримані результати дозволяють оцінити теплову стабільність основних елементів системи та можуть бути використані для обґрунтування заходів термостабілізації й оптимізації конструктивних та експлуатаційних рішень у системах, що працюють у режимах нестационарного променевого впливу.

Ключові слова: тепловий стан; променеві теплові потоки; нестационарний режим; чисельне моделювання; квазістационарний режим; внутрішні теплові навантаження; складні системи.

Вступ. Забезпечення допустимого теплового стану є ключовою вимогою для широкого спектра інженерних систем – від огорожувальних конструкцій складної конфігурації та елементів теплопостачання до компактних

електронних виробів з високою густиною тепловиділення. Для багатьох таких об'єктів визначальною є дія нестационарних променевих теплових потоків: змінне опромінення, циклічні режими «нагрівання-охолодження», періодичність зовнішніх факторів.

У будівельній галузі це проявляється, зокрема, під час аналізу огорожувальних конструкцій складної геометрії (ребра, ніші, виступи, комбіновані матеріали, теплові містки) за змінного сонячного опромінення; у системах теплопостачання — при оцінюванні температурних полів елементів обладнання в режимах змінної потужності та нерівномірного теплообміну.

Наносупутники класу CubeSat є показовими об'єктами для демонстрування можливостей чисельного підходу: поєднуються складна компоновка, локальні джерела теплоти, обмежені умови тепловідведення та циклічний променевий вплив.

Актуальність дослідження. Чисельне моделювання теплового стану є ефективним інструментом оцінювання температурних полів та термостабільності на ранніх етапах проектування. Для систем складної геометрії воно дозволяє врахувати теплові зв'язки між елементами, променевий та кондуктивний теплообмін, нестационарний характер зовнішнього впливу та часову структуру внутрішнього тепловиділення. Такі задачі потребують аналізу перехідних процесів, амплітуд температурних коливань і пікових значень температури, що є критичними для вибору методів термостабілізації та обґрунтування допустимих режимів роботи [1].

Актуальність даної роботи зумовлена необхідністю аналізу теплової поведінки системи складної конструкції за циклічного променевого впливу та змінних внутрішніх навантажень. На прикладі PolyITAN-3-PUT показано, як оцінювати квазістационарність і температурні коливання елементів у режимах, де система працює в повторюваних теплових циклах – постановка, методично сумісна з інженерними задачами в галузі теплопостачання та теплотехніки огорожувальних конструкцій.

Останні дослідження та публікації. У сучасних роботах щодо аналізу теплових режимів систем малої космічної техніки широко застосовуються чисельні методи моделювання, зокрема вузлові підходи та розрахунки в нестационарній постановці, що дозволяє враховувати складну геометрію, неоднорідні теплові навантаження та променевий теплообмін. Приклади постановок задач теплового моделювання nanosat-систем наведено у працях, присвячених тепловому моделюванню та експериментальному відтворенню теплових режимів наносупутників.

Окремий практичний напрям пов'язаний із термовакuumними дослідженнями та випробуваннями елементів конструкцій і теплоізоляційних

рішень космічної техніки, що дозволяє уточнювати припущення моделей і розширювати базу верифікації [2, 3].

Також актуальними є роботи, присвячені засобам вимірювання теплових потоків у термовакуумних дослідженнях, які формують методичну основу для подальшого порівняння «модель–експеримент» у верифікаційних кампаніях [4].

Практика моделювання й експериментального аналізу теплових режимів наносупутників у вітчизняній школі представлена в роботах, де розглянуто чисельні та експериментальні підходи до оцінки теплових режимів [5, 6].

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є чисельний аналіз теплового стану системи складної конструкції за умов впливу нестационарних променевих теплових потоків та змінних внутрішніх теплових навантажень на прикладі наносупутника PolyITAN-3-PUT, а також оцінювання процесу встановлення квазістационарного теплового режиму при багаторазовому повторенні циклів, аналіз температурних коливань і стабільності температури ключових елементів, інтерпретація отриманих залежностей з погляду обґрунтування заходів термостабілізації та контролю пікових температур у перехідних процесах.

Вихідні дані та умови чисельного моделювання. Чисельне моделювання виконувалося для кругової низької навколоземної орбіти з параметрами, обумовленими специфікою місії та умовами запуску. У розрахунках ураховано пряме сонячне випромінювання, відбите випромінювання Землі та її інфрачервоне випромінювання, що формують нестационарний променевий вплив та циклічність зовнішнього теплообміну.

Моделювання теплового стану виконувалося з використанням програмного середовища Siemens NX Space Systems Thermal, яке реалізує вузловий підхід до розв'язання нестационарних рівнянь теплопереносу з урахуванням кондуктивного, радіаційного та зовнішнього теплообміну. Загальні підходи до теплових випробувань та оцінювання теплових режимів виробів, як елементів верифікації та підтвердження прийнятих рішень, узгоджуються з вимогами відповідних стандартів теплових випробувань і верифікації [7, 8].

Термооптичні властивості зовнішніх поверхонь (визначальні для променевого теплообміну) приймалися з урахуванням підходів до вимірювання та задання таких характеристик для матеріалів терморегулювання [9]. Вимоги до придатності матеріалів у вакуумному середовищі, зокрема з погляду дегазації (що може впливати на довгострокову стабільність поверхонь та оптичних властивостей), враховуються на етапі добору матеріалів [10].

Для інформативності та відтворюваності наведено загальний вигляд конструкції та приклад дискретизування теплової моделі.

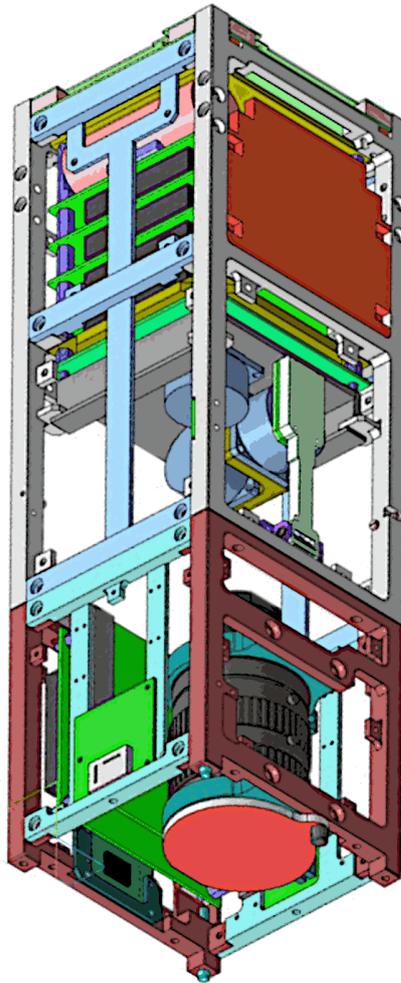


Рис. 1. Загальний вигляд конструкції та компоновки наносупутника PolyITAN-3-PUT

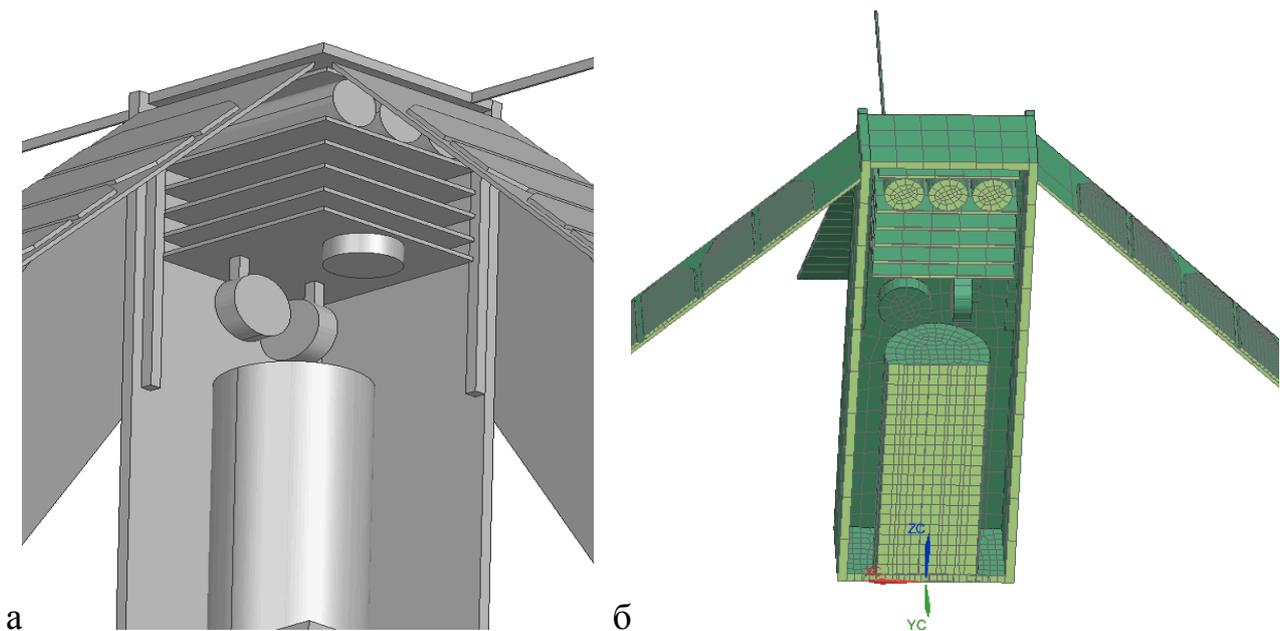


Рис. 2. Теплова модель PolyITAN-3-PUT:
а – загальний вигляд; б – вузлова дискретизація

Окремі внутрішні елементи корисного навантаження подано спрощеними об'ємами (зокрема циліндричними) для зменшення обчислювальної складності при збереженні теплової інерційності та основних теплових зв'язків.

Основні параметри:

- висота орбіти 600 км;
- ексцентриситет орбіти – нульовий;
- кут нахилу орбіти $98,5^\circ$;
- сонячна стала (прийняте в розрахунку граничне значення) 1429 Вт/м^2 ;
- альbedo Землі 0,306;
- потік інфрачервоного випромінювання Землі 232 Вт/м^2 .

Внутрішні теплові навантаження задавались у вигляді часових профілів тепловиділення, що відповідають різним режимам роботи бортової апаратури. Такий підхід є принциповим для задач, де критичними стають пікові температури та швидкість температурного відгуку системи на зміну режиму тепловиділення.

Аналіз результатів чисельного моделювання теплового стану. Отримані температурні залежності відображають просторово-часову поведінку теплового стану основних елементів конструкції при нестационарному променевому впливі та змінних внутрішніх теплових навантаженнях. Аналіз виконувався з урахуванням теплової інерційності елементів, характеру теплових зв'язків і локального тепловиділення.

Особлива увага приділялася встановленню квазістационарного режиму, який у системах з циклічною дією зовнішніх потоків характеризується повторюваністю температурних циклів та відсутністю довготривалого температурного дрейфу. Для задач теплопостачання та теплотехніки огорожувальних конструкцій аналогічно застосовують критерій переходу в повторюваний режим без накопичення теплоти від циклу до циклу, а інженерно значущими стають амплітуди коливань і пікові температури.

Для наочності подання нерівномірності нагрівання поверхонь за променевого впливу наведено приклад розподілу температури на зовнішніх поверхнях конструкції в один репрезентативний момент циклу (окремих часовий крок). Такий результат дозволяє ідентифікувати «гарячі зони» й області потенційного переохолодження, що методично близько до аналізу температурних полів огорожувальних поверхонь складної геометрії за нестационарного опромінення.

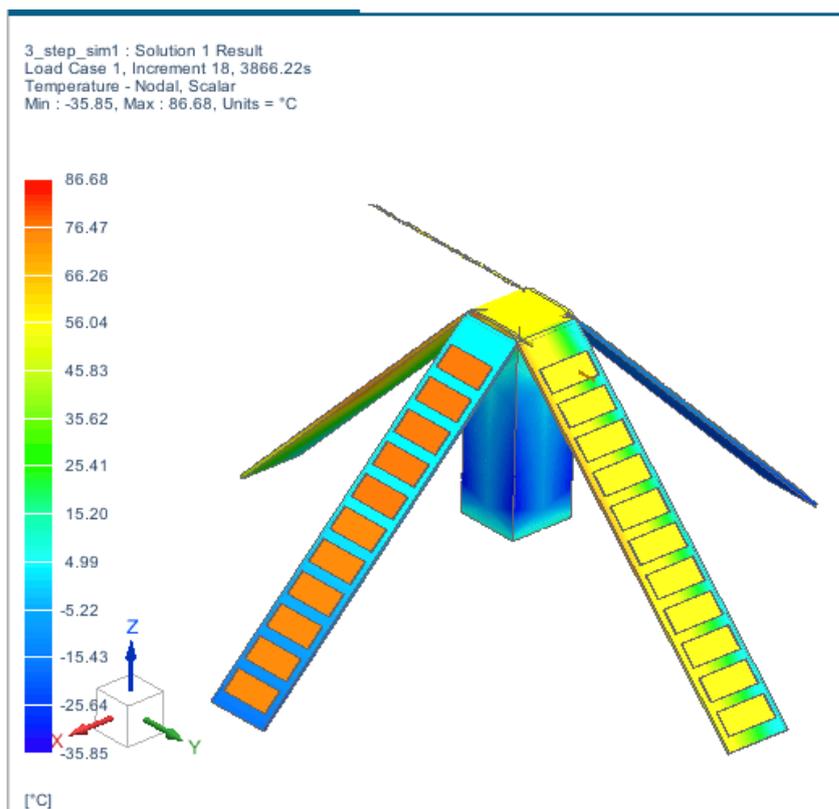


Рис. 3. Розподіл температур на зовнішніх поверхнях конструкції PolyITAN-3-PUT для репрезентативного моменту орбітального циклу. Діапазон температур за результатами розрахунку: від $-35,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $86,68\text{ }^{\circ}\text{C}$

Аналіз температурного стану об'єктива фотокамери. Тепловий стан корпусу об'єктива визначається сукупною дією зовнішніх орбітальних променевих потоків і внутрішніх теплових зв'язків із носійними елементами конструкції. За результатами чисельного моделювання встановлено, що для даного елемента формується регулярний циклічний температурний режим, який відтворюється при послідовних орбітальних витках.

Часова залежність температури корпусу об'єктива (рис. 4) характеризується періодичною зміною температури з чітко вираженими фазами нагрівання та охолодження. Після завершення початкового перехідного процесу температурні коливання набувають усталеного характеру, що свідчить про досягнення квазістаціонарного режиму. Амплітуда температурних коливань залишається практично сталою протягом усього розрахункового інтервалу, що вказує на стабільність теплового стану корпусу об'єктива за умов циклічного променевого впливу.

Форма температурної кривої демонструє асиметрію фаз нагрівання та охолодження: підвищення температури відбувається швидше порівняно з її зниженням, що узгоджується з тепловою інерційністю елемента та характером теплопередачі із суміжними вузлами.

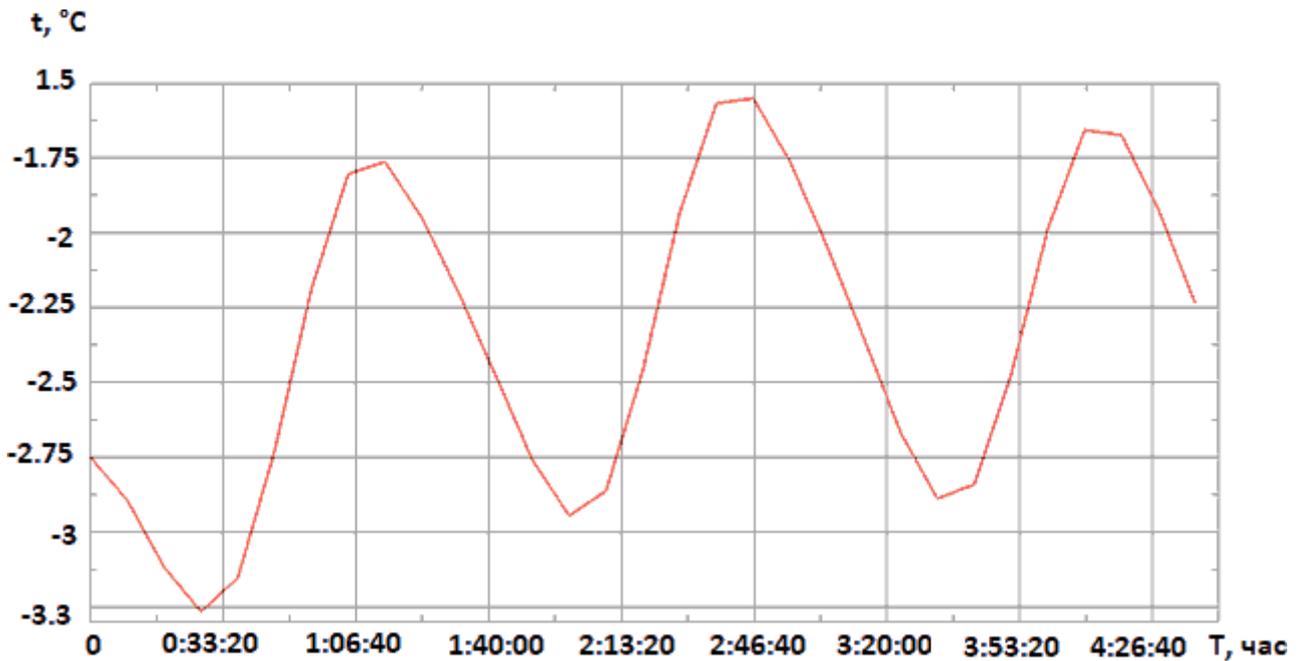


Рис. 4. Часова залежність температури корпусу об'єктива при орбітальному русі

Аналіз температурного стану фотокамери. Тепловий режим корпусу фотокамери формується під впливом зовнішніх орбітальних теплових факторів та внутрішніх теплових зв'язків, пов'язаних з конструктивними особливостями і функціональним призначенням даного елемента. Результати чисельного моделювання відображають динаміку температури, характерну для умов періодичної зміни теплового навантаження протягом орбітального руху. Часова залежність температури корпусу фотокамери (рис. 5) має виражений циклічний характер з більшою амплітудою температурних коливань порівняно з корпусом об'єктива.

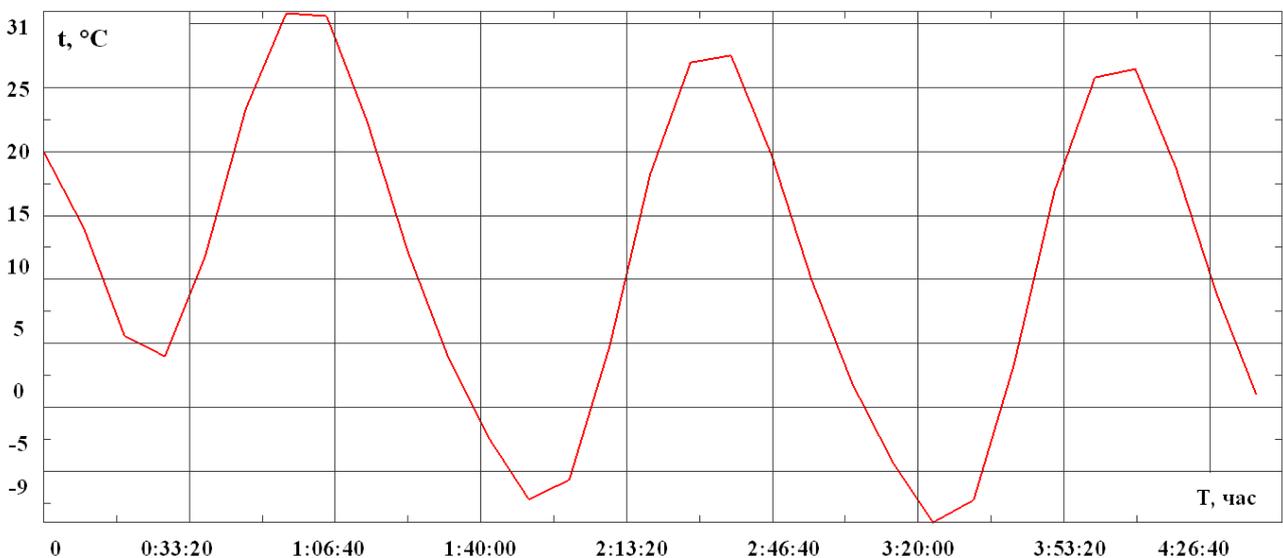


Рис. 5. Часова залежність температури корпусу фотокамери

У межах кожного орбітального витка спостерігається інтенсивна фаза нагрівання з досягненням максимальних значень температури, після чого відбувається поступове охолодження до мінімальних значень. Повторюваність температурних циклів свідчить про досягнення квазістаціонарного теплового режиму.

Температурна крива демонструє асиметрію між фазами нагрівання та охолодження, що може пояснюватися меншою тепловою інерційністю корпусу фотокамери та більш прямим впливом зовнішніх теплових потоків. Відсутність тенденції до поступового зростання або зниження середнього рівня температури підтверджує відсутність довготривалого теплового накопичення.

Аналіз температурного стану процесора ОЕС (обчислювальної електронної системи) у динамічному режимі. Температурний режим процесора ОЕС визначається змінним характером внутрішнього тепловиділення, яке формується відповідно до профілю функціонального навантаження бортової електроніки. На відміну від пасивних елементів конструкції, тепловий стан процесора істотно залежить від часової структури споживаної потужності, що безпосередньо відображається у динаміці температури. Для багатьох практичних систем (включно з елементами обладнання теплопостачання та локальними вузлами конструкцій) саме імпульсні режими можуть визначати пікові температури та вимоги до тепловідведення, тому аналіз перехідних процесів є принципово важливим. Часова залежність температури процесора ОЕС (рис. 6) демонструє складний циклічний характер, зумовлений чергуванням ділянок підвищеної та зниженої теплового навантаження.

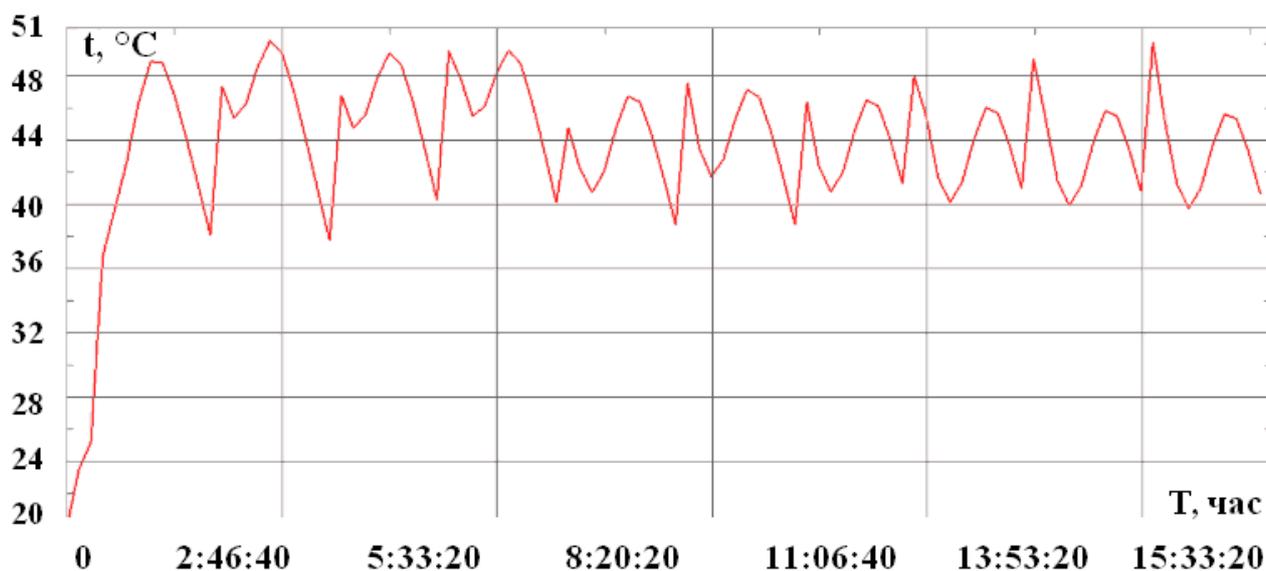


Рис. 6. Часова залежність температури процесора ОЕС при змінних режимах навантаження

На початковому етапі розрахунку спостерігається інтенсивне зростання температури, що відповідає виходу системи зі стартового стану та встановленню робочого режиму. Після завершення перехідного процесу температурна крива набуває регулярного повторюваного характеру.

Локальні максимуми температури відповідають фазам підвищеного тепловиділення процесора, тоді як зниження температури відбувається під час зменшення навантаження. Асиметрія температурних коливань проявляється у більш стрімкому зростанні температури порівняно з її зниженням, що зумовлено поєднанням високої питомої потужності тепловиділення та обмежених умов тепловідведення. Водночас відсутність поступового зростання середнього рівня температури при багаторазовому повторенні циклів свідчить про відсутність накопичення теплоти та про досягнення квазістаціонарного теплового режиму.

Висновки. Виконане чисельне моделювання теплового стану системи складної конструкції в умовах нестационарних променевих теплових потоків та змінних внутрішніх теплових навантаж у нестационарній постановці та запропонована практична схема інтерпретування результатів через критерії встановлення повторюваного режиму, амплітуди температурних коливань та пікових значень температури у перехідних режимах є універсальними для широкого класу теплотехнічних задач.

Для розглянутих елементів конструкції встановлюється квазістаціонарний режим: температурні цикли повторюються без довготривалого дрейфу середнього рівня температури. У прикладних задачах тепlopостачання та будівельної теплотехніки аналогічний висновок інтерпретується як відсутність накопичення теплоти від циклу до циклу (наприклад, у добових циклах опромінення та нагрівання), що дозволяє коректно оцінювати проектні запаси та режимні обмеження.

Для корпусів об'єктива й фотокамери супутника підтверджено регулярні циклічні коливання температури, зумовлені променевим впливом і тепловими зв'язками. Після перехідного етапу стабілізуються діапазони коливань температури, що дає можливість використовувати їх як інженерний показник термостабільності (аналогічно оцінюванню коливань температури огорожувальних конструкцій при нестационарному опроміненні).

Для процесора обчислювальної електронної системи показано, що імпульсні режими тепловиділення формують виражені температурні піки, а форма температурної кривої відтворює часову структуру навантаження. Це демонструє важливість аналізу перехідних режимів для об'єктів з локальними джерелами теплоти, де визначальними є найвищі досягнуті температури та

швидкість нагрівання й охолодження (типово для теплових вузлів обладнання та локальних зон підвищених теплонадходжень).

Просторове поле температури на зовнішніх поверхнях показує нерівномірність нагрівання за променевого впливу та дозволяє виділяти «гарячі зони». Методично це відповідає ідентифікуванню локальних перегрівів на поверхнях складної конфігурації та може використовуватися як інструмент для порівняння альтернативних конструктивних рішень за критеріями локальних максимумів температури та нерівномірності температурного поля.

Отримані результати підтверджують, що чисельний підхід “компонування – дискретизація – нестационарний розрахунок – аналіз повторюваності циклів і пікових температур” є придатним як для задач термостабілізації наносупутників, так і для узагальненого класу задач з нестационарними променевими теплонадходженнями в системах складної конструкції.

Перспективи подальших досліджень. Подальший розвиток роботи доцільно спрямувати на узагальнення підходу для задач теплопостачання та теплотехнічного аналізу огорожувальних конструкцій складної конфігурації за нестационарних впливів. Перспективні напрями передбачають:

- розширення граничних умов для наземних застосувань: перехід від орбітального циклу до добових і сезонних циклів опромінення, доповнення променевого теплообміну конвективним теплообміном із навколишнім середовищем, а також урахування змінних зовнішніх умов (температура повітря, вітер, хмарність) як нестационарних факторів;
- термооптичні властивості поверхонь і їх зміна з часом: уточнення параметрів поглинання та випромінювання для реальних покриттів і дослідження чутливості температурних циклів до зміни термооптичних характеристик (актуально і для покриттів огорожувальних конструкцій);
- формалізування показників режиму: введення узгодженого набору інженерних показників для порівняння конструктивних альтернатив, зосереджених на контролі найвищих та найнижчих температур, діапазону температурних коливань, швидкості зміни температури та ступеня нерівномірності температурного поля при нестационарному впливі;
- експериментальне підтвердження: планування порівняння “модель – експеримент” з використанням засобів вимірювання теплових потоків і випробувальних стендів (для космічного ставлення), або відповідних стендових/натурних вимірювань (для наземного ставлення), що дозволить уточнювати параметри теплових контактів і теплообміну та підвищити достовірність прогнозу пікових температур у перехідних режимах.
- теплоізоляційні рішення: аналіз впливу теплоізоляції та екранів на формування температурних циклів, рівномірність температурного поля та

зниження локальних перегрівів у системі за нестационарного променевого впливу.

- вимоги до матеріалів для вакуумних умов (для космічного ставлення): уточнення вимог до матеріалів з огляду на дегазацію та довгострокову стабільність поверхневих властивостей у вакуумі як фактор, що може змінювати реальний променевий теплообмін у часі.

References

1. European Cooperation for Space Standardization. Space Product Assurance – Measurements of Thermo-Optical Properties of Thermal Control Materials. ECSS-Q-70-09C, 31 Jul. 2008.
2. European Cooperation for Space Standardization. Thermal Vacuum Outgassing Test for the Screening of Space Materials. ECSS-Q-ST-70-02C, 15 Nov. 2008.
3. European Cooperation for Space Standardization. Thermal Testing for the Evaluation of Space Materials, Processes, Mechanical Parts and Assemblies. ECSS-Q-ST-70-04C, 15 Nov. 2008.
4. Tsiuk, T. A., Borys M. Rassamakin, S. M. Khairnasov, and V. I. Khominich. “Teplove modeliuвання nanosupytnyka NTUU ‘KPI.’” XIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia “Liudyna i kosmos”, Dnipropetrovsk, 2011, p. 263. (in Ukrainian)
5. Rogachov, V. A., D. V. Kozak, R. S. Melnyk, Yu. A. Poshtarenko, Borys M. Rassamakin, V. I. Khominich, V. V. Zakharov, and T. V. Moskalova. “Teplovakuumni vyprobuvannia zrazkiv ekranno-vakuumnoi teplovoi izoliatsii.” Kosmichna nauka i tekhnolohiia, vol. 29, no. 6, 2023, pp. 51–61. <https://doi.org/10.15407/knit2023.06.051>. (in Ukrainian)
6. Poshtarenko, Yu. A., Borys M. Rassamakin, V. A. Rogachov, V. I. Khominich, and M. D. Shevchenko. “Zasoby vymiriuvannia teplovykh potokiv pry termovakuumnykh doslidzhenniakh ta vyprobuvannakh vyrobiv kosmichnoi tekhniki.” Kosmichna nauka i tekhnolohiia, vol. 28, no. 1, 2022, pp. 51–60. <https://doi.org/10.15407/knit2022.01.051>. (in Ukrainian)
7. Poshtarenko, Yu. A., Borys M. Rassamakin, Yu. M. Sydorenko, V. I. Khominich, and M. D. Shevchenko. “Doslidnytsko-vyprobuvalnyi eksperymentalnyi termovakuumnyi stend TVK-2.5.” Kosmichna nauka i tekhnolohiia, vol. 26, no. 6, 2020, pp. 23–26. <https://doi.org/10.15407/knit2020.06.023>. (in Ukrainian)
8. National Aeronautics and Space Administration (NASA) Goddard Space Flight Center. General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects. GSFC-STD-7000B, 28 Apr. 2021.
9. Zavadzka, Ye. S., Borys M. Rassamakin, V. A. Rogachov, S. M. Khairnasov, and V. I. Khominich. “Eksperymentalne modeliuвання teplovykh rezhymiv

nanosupytnyka.” Tekhnologiia i konstruirovaniie v elektronnoi apparature, no. 4, 2013, pp. 27–30. <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/56346>. (in Ukrainian)

10. Liles, Kaitlin, et al. NASA Passive Thermal Control Engineering Guidebook. Revision 4.0, 25 Sept. 2023.

UDC 536.24

PhD in Engineering, **Borys Rassamakin**

bm rass@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8097-3678

PhD student, **Kostiantyn Polovynkin**

tech.polovinkin@gmail.com, ORCID: 0009-0006-0227-3346

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.42-54>

NUMERICAL SIMULATION OF THE THERMAL STATE OF COMPLEX STRUCTURES UNDER NON-STATIONARY RADIATIVE HEAT FLUXES

Abstract. *The paper presents the results of numerical simulation of the thermal state of complex systems subjected to non-stationary radiative heat fluxes and variable internal thermal loads. The study focuses on the analysis of transient thermal processes, temperature fluctuations, and peak temperature levels that arise under cyclic external radiative exposure combined with time-dependent internal heat dissipation. As a representative object characterised by strict dimensional, mass, and power constraints, the university 3U nanosatellite PolyITAN-3-PUT operating in low Earth orbit is considered. The thermal model is developed using a nodal numerical approach and incorporates the detailed structural geometry of the system, thermo-optical properties of external surfaces, conductive and radiative thermal couplings between elements, as well as orbital illumination conditions including direct solar radiation, Earth albedo, and terrestrial infrared emission. Internal thermal loads are defined by time-resolved heat dissipation profiles corresponding to different operating modes of onboard equipment, which enables the investigation of transient thermal responses rather than purely steady-state behaviour. Within the study, time histories of temperatures of key structural and functional elements are obtained and analysed. Particular attention is paid to the process of establishing a quasi-steady thermal regime under repeated thermal cycles, characterised by the absence of long-term temperature drift and the repeatability of temperature variations from cycle to cycle. The amplitudes of temperature oscillations and the resulting peak temperatures*

are evaluated as engineering-relevant indicators of thermal stability. The dynamic thermal response of electronic components to pulsed operating modes is analysed separately, highlighting the role of thermal inertia and limited heat rejection paths in the formation of local temperature maxima. The results demonstrate that the adopted numerical approach allows reliable identification of critical thermal zones, assessment of thermal margins, and evaluation of the effectiveness of thermal stabilisation strategies under non-stationary radiative environments. Although the analysis is performed for a nanosatellite system, the proposed methodology and interpretation framework are directly applicable to a broader class of engineering problems, including the thermal analysis of building envelopes and technical systems of complex configuration subjected to cyclic radiative and thermal loads.

Keywords: *thermal state; radiative heat fluxes; non-stationary regime; numerical simulation; quasi-steady regime; internal thermal loads; complex systems.*

Received/Надійшла до редакції 19.11.2025
Reviewed/Рецензована 17.12.2025
Accepted/Прийнята 25.12.2025