

Марчук Михайло<sup>1</sup>, Клименко Дмитро<sup>2</sup>,

Сіренко Володимир<sup>3</sup>, Харченко Володимир<sup>4</sup>

<sup>1</sup>завідувач відділу, доктор фіз.-мат. наук, професор, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів, Україна, e-mail:

[mv\\_marchuk@ukr.net](mailto:mv_marchuk@ukr.net)

<sup>2</sup>начальник відділу, канд. техн. наук, Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: [klymenko\\_dv@hotmail.com](mailto:klymenko_dv@hotmail.com)

<sup>3</sup>начальник комплексу, канд. техн. наук, старший наук. співроб., Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: [v.n.sirenko@i.ua](mailto:v.n.sirenko@i.ua)

<sup>4</sup>провідний фахівець, Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: [volodymyrnx@gmail.com](mailto:volodymyrnx@gmail.com)

## МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ НАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

**Анотація.** Розглянуті характерні властивості та особливості запропонованих математичних і комп'ютерних моделей механічної поведінки навантажених елементів конструкцій ракетно-космічної техніки для більш повного врахування реальних експлуатаційних умов у порівнянні з існуючими. Наведені приклади застосування запропонованих моделей при проектних розробках серійних та перспективних новітніх зразків ракетно-космічної техніки.

**Ключові слова:** ракетно-космічна техніка, навантаження, міцність, математична модель, комп'ютерна модель, неруйнівний експеримент.

**Вступ.** Підвищена напруженість тонкостінних та об'ємних елементів конструкцій сучасної ракетно-космічної техніки (РКТ) зумовлює використання найбільш досконалих математичних і розрахункових моделей, в яких по можливості необхідно достатньо повно відобразити реальні умови експлуатації конструкції та механічні властивості матеріалів. Тому крім традиційної властивості пружності матеріалу в розрахунках елементів конструкцій РКТ все більшого значення набувають його пластичні властивості. Особливо актуальним це питання постає при проектуванні елементів конструкцій рідинних двигунів РКТ, де протиріччя між вимогами міцності та мінімальної матеріаломісткості проявляється найбільш гостро. Прикладом може бути



випадок, коли ставиться завдання визначення допустимого (руйнівного) навантаження, при якому матеріал значної частини вказаних об'єктів перебуває в пружно-пластичному стані. Такий стан матеріалу, що не зумовлює порушення функціонального призначення конструкції та роботи її обладнання, допускається в деяких елементах конструкцій РКТ одноразового використання, а також при тривалому експлуатаційному навантаженні.

### **Характеристики математичних моделей конструкцій РКТ.**

Створення конструкцій ракетно-космічної техніки (РКТ), що найбільш повно відповідають умовам експлуатації, вимогам надійності, а також оптимальності у ваговому співвідношенні, зумовлює як розробку нових матеріалів, методів проектування і розрахунку, так і необхідність вдосконалення як існуючих і вже використовуваних, так і розроблення нових, більш точних їхніх математичних моделей [2, 4, 5].

Придатність математичної моделі для розв'язування задач дослідження характеризується тим, якою мірою вона володіє так званими цільовими властивостями, основними з яких є адекватність, стійкість і чутливість [1].

У загальному випадку під адекватністю розуміють ступінь відповідності моделі тому реальному явищу або об'єкту, для опису якого вона будується. Разом з тим, створювана модель орієнтована, як правило, на дослідження певного підмножини властивостей цього об'єкта. Тому можна вважати, що адекватність моделі визначається ступенем її відповідності не стільки реальному об'єкту, скільки меті дослідження.

При перевірці адекватності моделі як існуючої, так і спроектованої системи реально може бути використано лише обмежена підмножина всіх можливих значень вхідних параметрів. У зв'язку з цим для обґрунтування достовірності отриманих результатів моделювання велике значення має перевірка стійкості моделі. В теорії моделювання [1] це поняття трактується як здатність моделі зберігати адекватність при дослідженні ефективності системи на всьому можливому діапазоні робочого навантаження, а також при внесенні змін в конфігурацію системи.

Якщо зміна вхідних впливів або параметрів моделі (в деякому заданому діапазоні) не відображається на значеннях вихідних параметрів, то виникає потреба в оцінюванні чутливості моделі до зміни параметрів робочого навантаження і внутрішніх параметрів досліджуваного об'єкта. Таку оцінку проводять по кожному параметру моделі окремо. Базується вона на тому, що зазвичай діапазон можливих змін параметра відомий. Дані, отримані при оцінці чутливості моделі, можуть бути використані при плануванні експериментів: корегуються ті параметри, за якими модель є найбільш чутливою.



**Комп'ютерне моделювання.** Комп'ютерне моделювання – це процес відтворення поведінки об'єкта за допомогою комп'ютерної програми, що реалізує подання об'єкта у формі математичної моделі. Така програма називається комп'ютерною моделлю [1].

Результат комп'ютерного моделювання полягає в отриманні кількісних і якісних висновків щодо наявної моделі. Якісні висновки дають змогу виявити не відомі раніше властивості об'єкта: його структуру, динаміку розвитку, стійкість, цілісність та ін. Кількісні висновки в основному носять характер прогнозу деяких майбутніх або пояснення минулих значень змінних, що характеризують систему. За допомогою комп'ютерного моделювання вивчаються об'єкти, які неможливо, дорого або небезпечно відтворювати в реальних умовах. Це дає змогу не лише зекономити матеріальні ресурси, а й дотримуватися екологічних умов, уникати можливих шкідливих або руйнівних наслідків проведення випробувань. Комп'ютерне моделювання дозволяє візуалізувати об'єкти будь-якої природи, здійснювати багаторазові випробування їхніх моделей, кожного разу повертаючи їх в початковий стан; отримувати різні характеристики об'єкта в числовому або графічному вигляді; знаходити оптимальну конструкцію об'єкта, не виготовляючи його пробних екземплярів. Воно полягає в проведенні серії числових експериментів на комп'ютері, метою яких є аналіз та інтерпретація; зіставлення результатів моделювання з реальною поведінкою досліджуваного об'єкта; за необхідності, подальше уточнення моделі. Кінцева мета комп'ютерного моделювання – ухвалення рішення на основі всебічного аналізу його результатів. Основою вироблення рішення є результати тестування й експериментів. Якщо результати не відповідають цілям поставленого завдання, це значить, що допущено помилки на попередніх етапах. Якщо такі помилки виявлено, то потрібне коригування моделі, тобто повернення до одного з попередніх етапів. Процес повторюється доти, поки результати експерименту не відповідатимуть цілям моделювання.

Слід зазначити, що метод комп'ютерного моделювання є чисельним методом, і тому, як будь-який чисельний метод, він має істотний недолік – його результати завжди носять частковий характер, котрі відповідають певним значенням параметрів об'єкта. Для його аналізу необхідно багаторазово моделювати процес його функціонування, варіюючи вхідні дані моделі.

**Приклади застосування та висновки.** Вище наведені принципи математичного та комп'ютерного моделювання були застосовані авторами та їх співробітниками до



розв'язання низки важливих науково-технічних проблем при вдосконаленні існуючих і проектуванні нових перспективних зразків РКТ. Розроблено методику розрахунку корпусів твердопаливних двигунів типу «кокон» із багатошарових композитів за комплексної дії навантажень з урахуванням нагріву та стику з суміжними відсіками. Створено методики розрахунку міцності деталей сопел в таких двигунах за інтенсивного термосилового навантаження та оболонкових конструкцій із шаруватих композитів з гіперпружними складниками. Розроблені основи та створена методологія оцінки механічного стану та визначення фактичних руйнівних навантажень оболонкових конструкцій за результатами моделювання та неруйнівних експериментальних випробувань [3, 5]. Все це має значний вплив на швидкість і якість проєктних розробок.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кононюк, А. Ю. (2012). *Узагальнена теорія моделювання. Основи*. Освіта України.
2. Marchuk, M., Khomyak, M. (2024). *New Structural Approach for Determination of Effective Thermoelastic Modules of Discrete Composite Layers* / In: H. Altenbach, V. Bogdanov, A. Grigorenko, R. Kushnir, V. Nazarenko, V. Eremeyev (eds). *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods. Advanced Structured Materials*, Springer Nature.
3. Дробенко, Б.Д., Марчук, М.В. (2023). Розрахункове моделювання руйнівних випробувань ракетних конструкцій. *Мат. методи та фіз.-мех. поля*, (66, № 3–4), 169–179 с.
4. Марчук, М.В., Пакош, В.С., Харченко, В.М., Хом'як, М.М. (2022). Ефективні термопружні модулі дискретних композиційних шарів у межах моделі ортотропного матеріалу. *Мат. методи та фіз.-мех. поля*, (65, № 3-4), С. 111–122.
5. Drobenko, B.D., Kushnir, R.M., and Marchuk, M.V. (2021) Methodology for Exploration of the Strength and Determination of Destructive Load of Rocket and Space Engineering Constructions. *Sci. innov.*, (17, no. 3), P. 28–36.

