

А.В. Внуков, О.О. Челобітченко, В.М. Грень

*Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ*

## **ВИБІР МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ**

*У статті розглянуто основні існуючі методи технічної діагностики авіаційних газотурбінних двигунів. Проаналізовано перспективні, з точки зору інформативності, методи технічної діагностики. Зазначено, що для підвищення ступеня визначення технічного стану двигунів потрібно застосовувати поєднання різноманітних методів і засобів діагностики. Запропоновано розширити перелік застосовуваних в експлуатації методів діагностики за рахунок сучасних методів трибодіагностики, вібродіагностики та сучасних ендоскопічних засобів.*

**Ключові слова:** *технічна діагностика, авіаційний газотурбінний двигун, технічний стан, метод діагностики.*

### **Вступ**

**Постановка проблеми.** Пріоритетним напрямом у галузі підвищення безпеки польотів авіаційної техніки є удосконалення як структури та організації технічної діагностики, так і її процесів, направлених на забезпечення раннього виявлення передвідмовних станів високонавантажених елементів літальних апаратів.

Переведення старіючого парку авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), які застосовуються у державній авіації України, на експлуатацію за технічним станом потребує наявності ефективних інструментальних методів і засобів діагностики, які б дали змогу здійснювати контроль та прогнозування технічного стану двигунів.

Існує багато засобів та методів технічної діагностики двигунів. Відносно різноманіття методів пояснюється тим, що жоден з них не дає можливості оцінити стан двигуна з достатнім ступенем деталізації, оскільки вони несуть специфічну інформацію різної важливості. За допомогою поєднання ряду методів можливо здійснити більш глибокий контроль (як правило, на землі), але це часто потребує спеціальних умов та тривалого часу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для авіаційних ГТД, які є складними конструктивними і функціональними системами, характерна поява в експлуатації значної кількості відмов і несправностей різної фізичної природи. Типові несправності та засоби моніторингу двигунів літальних апаратів розглянуті у роботі [1].

Широку номенклатуру відмов і несправностей авіаційних ГТД неможливо виявляти одним методом діагностики. Практика підтверджує, що для цілей виявлення всіх можливих несправностей ГТД потрібна наявність розвинутої системи

технічної діагностики, заснованої на поєднанні різноманітних методів і засобів. Тому питанням технічної діагностики авіаційних ГТД приділяється значна увага.

У [2] описані найбільш розповсюджені методи діагностики авіаційних ГТД: візуально-оптичний метод, радіографічний метод та метод оцінки температурного стану, метод діагностики деталей, що омиваються маслом.

Деякі найбільш перспективні, на думку автора, методи технічної діагностики авіаційних ГТД розглянуті в роботі [3]: за результатами аналізу термогазодинамічних параметрів, по тепловим параметрам, по віброакустичним параметрам, трибодіагностика, по вибігу ротора.

Стаття [4] присвячена розгляду процесу контролю стану ГТД без його демонтажу з літального апарата, заснованому на аналізі домішок шкідливих речовин у системі кондиціонування повітря з метою прогнозування зношення ущільнень опор роторів, стан яких у значному ступені впливає на працездатність та коефіцієнт корисної дії авіаційного ГТД.

У [5] розглянуті методи діагностики несправностей авіаційних двигунів, які дають можливість визначення деградацій на рівні модуля, визначення тенденцій цих деградацій під час використання двигуна та планування упереджувального технічного обслуговування: аналіз газодинамічних параметрів, фільтри Калмана, генетичні алгоритми тощо.

Розгляду питань діагностики авіаційних ГТД за акустичними характеристиками на холодному режимі при невеликих швидкостях повітря в газовому тракті присвячена робота [6].

У [7] розглянуті аналітичні та емпіричні методи діагностики газового тракту двигуна, проведене їх тестування та порівняння.

Робота [8] присвячена питанням віброакустичної діагностики тріщиноподібних ушкоджень лопатей авіаційного двигуна в усталеному і нестационарному режимах.

Одним з пріоритетних напрямів діяльності Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України з питань діагностики є пошук надійних діагностичних параметрів наявності пошкоджень у робочих лопатках [9]. В Інституті розроблено наукові основи вібродіагностики наявності локальних поверхневих недосконалостей за зміною спектра власних частот коливань і дихаючих тріщин втомі за характеристиками супер- і субгармонійного резонансів досліджуваних пружних тіл як необхідної умови забезпечення функціональної працездатності високонавантажених вузлів сучасних газотурбінних двигунів.

Методи обробки вібраційних сигналів вузлів авіаційних ГТД обговорюються у [10]. У роботі визначена проблема ідентифікації дефектів елементів ГТД щодо частотного складу діагностичного сигналу. Запропонований частотно-часовий аналіз діагностичного сигналу із застосуванням вейвлет-перетворення для прогнозування стану вузлів ГТД, які контролюються.

Сформульовані основні вимоги до вихоротокових портативних дефектоскопів для виявлення поверхневих дефектів в авіаційних конструкціях [11]. Розглянуті методичні особливості вихоротокового контролю елементів авіаційних конструкцій.

У статті [12] розглянуті сучасний стан і основні проблеми неруйнівних методів контролю робочих лопаток турбомашин, визначені області застосування цих методів. Розглянуті основні методи контролю; визначені причини, що обмежують можливості даних методів; проаналізовані газодинамічні методи контролю; визначені акустичні методи контролю, системи сканування зрізу сопла; проведено аналіз систем, які здатні здійснювати контроль працездатності проточної частини турбомашин; визначені математичні моделі, що описують акустичні процеси в проточній частині турбомашин та шляхи їх удосконалення.

У [13] розглядається процес здійснення діагностики газоповітряного тракту із застосуванням розробленої NASA методології діагностики двигунів (ProDiMES). Алгоритм, закладений у методологію, використовує середнє для парку та індивідуальне базове значення моделі

двигуна для обчислення векторів ознак, які формують класифікацію помилок із справним і несправним двигуном.

Загальний метод раннього виявлення аномалій у роботі двигунів із застосуванням великої кількості даних, отриманих під час польотів літаків, представлений у [14]. Основна ідея методу полягає у створенні дуже великого числа бінарних індикаторів на основі оцінок параметричних аномалій, розроблених експертами, та доповнених простими агрегаціями цих оцінок. Кращі індикатори обираються за класичною форвардною схемою, що веде до значного зменшення кількості індикаторів, налаштованих на набір даних.

Робота [15] присвячена системі виявлення та усунення несправностей, яка навчена на виявлення одиночних несправностей. Для виявлення одночасних несправностей запропоновано застосовувати багатозначне навчання, додаючи невелику кількість одночасних несправностей у навчальний набір даних.

У статті [16] обговорюються різні механізми, які призводять до деградації компонентів авіаційного двигуна та впливу на характеристики двигуна. Розглядаються різні системи моніторингу стану двигуна (ЕНМ), які допомагають оцінювати працездатність двигуна на основі моніторингу параметрів.

Авторами роботи [17] запропоновано умовно-коректну постановку завдання оцінки величин розрахункових параметрів функціональних елементів у процесі експлуатації газотурбінних двигунів із множинними відмовами на основі даних вимірів симптомів.

У [18] розглянуто застосування нейромережевих технологій в системі контролю технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 у польотних режимах. Зазначено, що перевагою розглянутого алгоритму є можливість роботи з малими навчальними вибірками, призначенням м'яких допусків, використанням досвіду експертів для оцінки технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117, що є важливим в умовах неповноти інформації.

Запропоновано метод оцінки можливої кількості варіантів ідентифікації математичної моделі ГТД для адекватного опису результатів випробувань в умовах обмеженої кількості вимірюваних параметрів [19].

Задача автоматизації скорочення розмірності даних для побудови діагностичних моделей авіаційних двигунів на основі стаціонарних одновимірних сигналів, розподілених у часі, вирішена у [20].

У роботі [21] розроблено метод контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна

ТВ3-117 в польотних режимах із застосуванням модернізованих методів найменших квадратів й зрівнювання. Метод дає змогу оцінити фактичне відхилення параметрів двигуна від розрахункових, зумовлених похибкою виготовлення і деформацією елементів проточної частини у процесі напрацювання, й підвищити інформативність і скоротити загальний час контролю і діагностики в 2...3 рази завдяки використанню індивідуальної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117 і розширеної експертної бази знань про його характеристики.

Експериментально-статистичні методи діагностики та прогнозування надійності авіаційних ГТД у процесі виробництва та в експлуатації, які включають елементи штучного інтелекту розглянуті у [22, с. 148...207].

Таким чином, з аналізу останніх публікацій бачимо, що на сьогодні існує безліч наукових розробок, присвячених проблемам практичної діагностики авіаційних ГТД. Але більшість цих робіт присвячена вузько поставленим задачам аналітичної та інструментальної діагностики. До того ж, впровадження новітніх розробок не завжди можливо на авіаційних двигунах розробки 70-80-х років ХХ століття, які встановлені на літаках державної авіації України з причини низької контролепридатності цих двигунів у порівнянні з сучасними авіаційними двигунами іноземного виробництва.

**Мета статті** – підвищення можливостей спеціалістів з діагностування експлуатувальних частин державної авіації України за достовірним визначенням технічного стану ГТД шляхом впровадження і застосування вибраних методів технічної діагностики з числа сучасних найбільш інформативних методів.

#### **Виклад основного матеріалу**

Основною метою технічної діагностики авіаційного ГТД є організація процесу оцінки його технічного стану. Ця організація базується на основних положеннях загальної теорії діагностики, методах побудови і аналізу математичної моделі об'єкта діагностики.

Специфіка вирішення задач діагностики авіаційних ГТД полягає у такому [23, с. 139...140]:

складність об'єктів діагностики унеможливорює отримання універсальних рішень, породжує труднощі при складанні алгоритмів діагностики та потребує різних підходів до вирішення конкретних задач;

різноманіття режимів роботи ГТД при експлуатації;

обмеження за габаритами і вагами засобів діагностики;

недостатньо висока контролепридатність ГТД, тобто неможливість вимірювання параметрів, необхідних для пошуку дефектів;

необхідність виявлення несправностей на початковій стадії їх розвитку та запобігання відмов у польоті;

складність природи та багатопричинність відмов, що виникають у ГТД.

Широку номенклатуру відмов та несправностей авіаційних ГТД неможливо виявляти одним методом діагностики. Практика підтверджує, що для виявлення усіх можливих несправностей ГТД потрібна наявність розвинутої системи технічної діагностики, заснованої на поєднанні різних методів та засобів [24, с. 8].

Для більш достовірного визначення технічного стану двигуна доцільно використовувати параметри, які мають максимальну інформативність, при цьому доповнюють та уточнюють один одного. Порівняльний аналіз методів діагностики ГТД проведений в роботі [25, с. 10] з використанням досвіду експлуатації авіаційної техніки із застосуванням методу експертних оцінок. Згідно з цим аналізом найбільшу інформативність (9,5 балів з 10 можливих) має тепловий метод (інфрачервона термографія), інформативність трибодіагностики (аналіз проб масла) складає 8,5 балів, ендоскопії – 8,0 балів, віброакустичного методу – 7,5 балів, методу за термогазодинамічними параметрами – 6,0 балів, аналітичних методів – від 5,5 до 7,0 балів. Для вибору найбільш перспективних методів діагностики для експлуатації двигунів радянського виробництва та розробки рекомендацій з їх застосування розглянемо методи, які мають найбільш високу інформативність.

Одним із найбільш інформативних методів оцінки стану АТ є методи контролю теплових параметрів [26, с. 363].

У теперішній час їх використання в польоті обмежується контролем температури в різних точках, наприклад, проточної частини двигуна, і порівнянням її з допустимими значеннями. Більшого застосування теплові методи знайшли при стендових випробуваннях ГТД. Основною перевагою їх є можливість отримання інформації без суттєвого розбирання авіадвигуна.

При термометруванні робочих лопаток турбіни на них встановлюють термопари та загальний струмознімач. Це спричиняє незручності для формування діагнозу внаслідок обмеженої кількості точок контролю.

Методи безконтактного термометрування мають деякі переваги [27, с. 54]. Об'єктами безконтактної термометричної діагностики можуть бути як двигун загалом, так і окремі його агрегати

та деталі. Система контролю перетворює інфрачервоне зображення на видиме таким чином, щоб розподіл видимої яскравості був пропорційним інфрачервоній яскравості об'єкта, тобто просторовому розподілу температури  $T(y,z)$  чи коефіцієнта випромінювання  $\varepsilon(y,z)$ .

Одним із інформативних методів виявлення дефектів важкодоступних вузлів ГТД є метод інфрачервоної термографії [26, с. 290]. Його поділяють на активний та пасивний методи. Активний передбачає попереднє нагрівання об'єкта. Спостереження теплових явищ на поверхні в результаті поширення тепла по матеріалу можуть дати інформацію про його внутрішню структуру. При цьому джерело тепла, що використовується, слугує для створення у матеріалі "термоудару", а приймальна термографічна система аналізує розсіювання та поширення теплових хвиль.

Обмеження сфери застосування методу пов'язані з тим, що спостереження можуть проводитися лише у перехідному режимі, коли визначаються відносні швидкості поширення теплового потоку всередині матеріалу. Після досягнення температурної рівноваги теплові контрасти не спостерігаються. До того ж, такі об'єкти, як авіаційні ГТД мають велику контрольовану поверхню, здійснення рівномірного нагрівання поверхні буде складним.

Складнощі у застосуванні методу пояснюються тим, що він залежить від великої кількості параметрів, які мають бути враховані для кожного застосування. До них відносяться [28, с. 52]:

- коефіцієнт випромінювання випробовуваного матеріалу;
- тип інфрачервоного приймального пристрою;
- поле зору та розміщення приймального пристрою;
- швидкість переміщення приймального пристрою відносно об'єкта;
- природа та інтенсивність нагріву (за допомогою звичайних джерел або лазерів);
- фокусування теплового потоку;
- відстань між джерелом тепла та випробовуваним об'єктом;
- відстань між джерелом тепла та інфрачервоною приймальною системою.

Істотним недоліком активного методу в оцінці стану функціональних систем ГТД можна вважати можливість контролю лише тих деталей, які перебувають у його поверхні (корпусі).

Більш широкі можливості щодо цього має пасивний метод. Він полягає у використанні природного тепла, що виділяється в процесі функціонування ГТД, та у спостереженні за допомогою пасивного приймального

інфрачервоного пристрою розподілу температур у часі та у просторі.

Порівняння з ідеальною моделлю розсіювання тепла дає змогу визначити всі відхилення температури, важливі для функціонування об'єкта. Різниця температур окремих зон характеризує умови тепловідведення від них, і тим самим, фізико-хімічний склад, товщину, структуру, наявність дефектів тощо.

Пасивний метод є більш перспективним і може бути використаний для визначення найбільш інформативних точок на поверхні двигуна з метою встановлення в цих зонах вбудованої системи контролю (термодатчиків). При візуальному контролі для паралельного знімання інформації використовують досить коштовні електронно-оптичні перетворювачі - евапографи, еджеографи, прилади з рідкими кристалами та фоточутливими плівками, тепловізори тощо.

Засоби діагностики за тепловими параметрами дають змогу безпосередньо виявляти дефекти та прогнозувати їх розвиток у процесі випробувань ГТД, існуючі методи обробки інфрачервоного термометрування дають змогу прогнозувати конкретні несправності. Але застосування цих методів при експлуатації авіаційних ГТД, які встановлені на літак, є проблематичним.

Досить інформативним методом також є трибодіагностика [28, с. 60...69]. Процес руйнування деталей, як правило, починається з руйнування поверхневого шару матеріалу під дією значних динамічних напружень, що проявляється у вигляді відривів частин матеріалу [29, с. 18]. Це призводить до підвищеної концентрації напружень у місцях відриву і, як наслідок, до подальшого розвитку процесу руйнування. При цьому продукти зношення виносяться маслом, що циркулює у двигуні. Їх наявність та накопичення можуть бути сигналом про виникнення несправності. Масло в даному випадку є носієм інформації про стан пар, що труться. Як показує досвід, відрізок часу від початку процесу руйнування поверхневого шару до моменту повного руйнування деталі, як правило, досить великий, що дає можливість виявляти несправності на початковому етапі процесу зношення. Кількість та форма продуктів зношення, що надходять у масло, залежить від швидкості накопичення частинок зношення. Найбільш поширеними методами трибодіагностики є: магнітний, спектральний аналіз, колориметричний, фєрографічний, метод радіоактивних ізотопів [30, с. 76]. Кожен із них є більш інформативним, ніж, наприклад, методи вібродіагностики.

Магнітний метод заснований на вимірюванні сили взаємодії феромагнітних частинок масла зі штучно створеним зовнішнім магнітним полем. Оскільки кількість феромагнітних металів у працюючому маслі двигунів зазвичай істотно більше, ніж інших продуктів зношення, то їх визначення може слугувати інтегральною оцінкою ступеня зношення пар двигуна, що труться. Електромагнітний метод контролю як різновид магнітного методу, заснований на взаємодії змінного магнітного поля котушки індуктивності з електромагнітним полем, що виникає від вихрових струменів металевих частинок у працюючому маслі. До недоліків методу слід віднести малу чутливість аналізаторів, їх схильність до впливу зовнішніх змінних полів, а також неможливість визначення немагнітних частинок зношення.

Емісійно-спектральний метод використовує явище світіння газу досліджуваної речовини внаслідок нагрівання його до температури понад 1000 °С. При таких температурах енергія руху частинок газу така, що при їх зіткненні відбуваються процеси дисоціації та іонізації, внаслідок яких, поряд з атомами та молекулами, у газі утворюються вільні електричні заряди-іони та електрони. Нагрітий, частково іонізований газ-плазма, що проводить електричний струм, випромінює електромагнітні коливання в оптичному діапазоні спектру.

Істотною складовою цього випромінювання є лінійчасті спектри атомів, у яких кожному елементу відповідає своя довжина хвилі випромінювання певної інтенсивності. Досліджуючи спектр, можна визначити хімічний склад газу, що його утворює, і, отже, склад аналізованої проби. Інтенсивність аналітичних спектральних ліній (потужність випромінювання одиниці об'єму плазми) пропорційно пов'язана із концентрацією відповідних елементів у пробі. Установка дає змогу визначити як якісний, так і кількісний склад проби. Для проведення кількісного аналізу необхідно вибрати адекватну модель спектроаналітичного процесу (зв'язок між сигналом і концентрацією елемента, що досліджується) і провести з її допомогою градування установки.

Рентгеноспектральний метод заснований на реєстрації довжини хвилі та інтенсивності характеристичного флуоресцентного випромінювання хімічних елементів, що входять до складу "сухої" масляної проби. Характеристичне випромінювання – це квантове випромінювання з лінійчастим (дискретним) спектром, що виникає за зміни енергетичного стану атома. Довжина хвилі характеристичного випромінювання залежить від атомного номера хімічного елемента і зменшується

з його зростанням. Явище флуоресценції пов'язане з переходом атомів, молекул чи іонів із збуджених станів у нормальний стан під впливом характеристичного випромінювання. Випромінювання збуджується рентгенівськими променями, направленими на масляну пробу. Характеристичне випромінювання елементів виділяється з вторинного випромінювання зразка кристал-аналізатором і реєструється за допомогою селективних рентгенівських фільтрів і пропорційних лічильників.

Сцинтиляційний метод заснований на реєстрації заряджених частинок за допомогою підрахунку спалахів світла, що виникають при попаданні цих частинок на екран.

Сцинтиляційний лічильник є поєднанням сцинтилятора (фосфору) і фотоелектронного помножувача (ФЕП). У комплект лічильника входять також джерело електричного живлення ФЕП та радіотехнічна апаратура, що забезпечує посилення та реєстрацію імпульсів ФЕП. Іноді поєднання фосфору з ФЕП здійснюється через спеціальну оптичну систему (світлопровід). Принцип роботи сцинтиляційного лічильника є таким. Заряджена частинка, потрапляючи в сцинтилятор, здійснює іонізацію та збудження його молекул, які через  $10^{-6}$ - $10^{-9}$  секунд переходять у стабільний стан, випромінюючи фотони. Виникає спалах світла (сцинтиляція). Деяка частка фотонів потрапляє на фотокатод ФЕП та вибиває з нього фотоелектрони. Останні під впливом прикладеної до ФЕП напруги фокусуються і направляються на перший електрод (динод) електронного помножувача. Далі, в результаті вторинної електронної емісії, число електронів лавиноподібно збільшується, і на виході ФЕП з'являється імпульс напруги, який вже посилюється і реєструється радіотехнічною апаратурою. Амплітуда та тривалість імпульсу на виході визначаються властивостями як сцинтилятора, так і ФЕП. Як фосфори використовуються: органічні кристали, рідкі органічні сцинтилятори, тверді пластмасові сцинтилятори, газові сцинтилятори. Основними характеристиками сцинтиляторів є світловий вихід, спектральний склад випромінювання та тривалість сцинтиляцій. При проходженні зарядженої частинки через сцинтилятор у ньому виникає кілька фотонів з тією чи іншою енергією. Частина цих фотонів буде поглинатися в об'ємі самого сцинтилятора, і замість них буде випромінено інші фотони з дещо меншою енергією. У результаті процесів реабсорбції назовні виходитимуть фотони, спектр яких характерний для даного сцинтилятора. Дуже важливо, щоб спектр фотонів, що виходять із сцинтилятора, збігався чи хоча б частково перекривався зі спектральною характеристикою

ФЕП. Ступінь перекриття зовнішнього спектра сцинтиляції зі спектральною характеристикою цього ФЕП визначається коефіцієнтом узгодження.

ВАТ “НВО “Сатурн” розроблено експресний кількісний спосіб отримання максимально можливої діагностичної інформації про параметри частинок зношення, що знаходяться в маслі, в змивах з маслофільтра, магнітних пробок, фільтрів-сигналізаторів тощо [28, с. 66]. Застосування сцинтиляторного аналізатора дає змогу оперативно оцінювати не тільки загальний технічний стан двигуна за критерієм “справний”-“несправний”, а й окремо оцінювати технічний стан підшипників трансмісії та коробок приводів авіадвигунів.

В основу колориметричного методу покладено закон Ламберта-Бера та принцип вимірювання коефіцієнта пропускання світла через досліджуване середовище. На фотоприймач по черзі прямують світлові потоки: повний і потік, що пройшов через еталонне і потім масляне середовище, далі визначається співвідношення цих потоків. Як зразок використовується або дистильована вода, або масло, що відповідає нормам ТУ. За значеннями оптико-колірних характеристик досліджуваних проб масла визначають стан вузлів тертя, що омиваються маслом.

При органолептичному методі ступінь часток зношення виявляється візуально або з використанням пристроїв (магнітні пробки, фільтри, сигналізатори). Сигналізатори стружки, що встановлюються на ГТД (електронні, електромеханічні тощо), мають один важливий недолік, який пов'язаний з можливістю помилкового спрацьовування через накопичення смолистих речовин у маслі та різного роду сторонніх забруднень, що не мають відношення до розвитку дефекту. Сигналізатори тільки фіксують наявність зношування, але не дають змоги відстежувати швидкість процесу накопичення стружки в маслі. Таким чином, цей метод є недостатньо інформативним з точки зору точності виявлення морфології частинок зношення.

Ферографічний метод – це метод мікроскопічного аналізу частинок, відокремлених від рідин. Метод має низку переваг порівняно з методами, згаданими вище, головним з яких є низька похибка вимірів. Для оцінки стану пар, що труться, користуються двома типами ферографів. Це аналітичний ферограф і прямопоказувальний ферограф. Останній оцінює масову концентрацію домішок у пробі; за допомогою аналітичного ферографа вивчаються морфологічні ознаки частинок зношування з метою встановлення “адреси” дефекту. Частинки, які разом з маслом стікають по похилій поверхні пластини, виготовленої з кварцового скла, піддаються впливу

градуїзованого магнітного поля, під впливом якого Fe-частинки осідають у порядку зменшення свого розміру. Мінімальний розмір часток – від 3,0 мкм до 5,0 мкм. Концентрація частинок “уловлюється” у двох областях: на вході в зону відкладення та на відстані 4 мм від цієї зони. У цих точках проводиться вимірювання інтенсивності проходження світла через відкладення, яка пропорційна концентрації частинок у пробі.

Метод радіоактивних ізотопів полягає у встановленні на двигун активованої деталі, зношення якої потрібно визначити. У процесі роботи двигуна радіоактивні частинки разом із іншими продуктами зношення потрапляють у масло. Ступінь зношування деталі визначають на основі вимірювання радіоактивності масла. Цей метод є високо інформативний, тому що безпосередньо вказує “адресу” дефекту. Основними способами активації масла є встановлення радіоактивних вставок на заданих ділянках поверхні деталі; опромінення деталей нейтронами; введення ізотопів у метали під час їхнього плавлення; електролітичне покриття деталей радіоактивним елементом. Застосування радіоактивних ізотопів для дослідження зношення має низку переваг. Цей метод має високу чутливість і можливість безперервної реєстрації вимірювань безпосередньо при роботі двигуна. За його допомогою можна визначати зношування заданої ділянки деталі. Крім того, метод дає змогу дослідити низку питань, пов'язаних з роботою та зношенням двигуна: припрацювання деталей при пусках, характер зношування (корозійний, механічний тощо), витрата масла та ін. Однак, визначення зношення деталей методом радіоактивних ізотопів має певну складність. До цього необхідно додати, що застосування методу обмежене необхідністю спеціальної підготовки двигуна перед випробуваннями, а також біологічного захисту обслуговуючого персоналу від випромінювання. Метод дає змогу оцінювати зношення лише однієї деталі (або групи деталей). Одночасне роздільне визначення зношення кількох деталей дуже складно, тому що вимагає застосування ізотопів з різними енергіями випромінювання та спеціальної апаратури для розділу.

Прилади діагностики, побудовані на рентгеноспектральному та емісійно-спектральному методах досить успішно застосовуються на авіаремонтних заводах. Можливо їх застосування й в експлуатуючих частинах. На наш погляд, є доцільним впровадження в практику діагностики в експлуатації також прилади контролю, які побудовані на сцинтиляційному методі.

Віброакустична діагностика АТ також є достатньо інформативною. Вона базується на загальних принципах розпізнавання станів технічних систем за вихідною інформацією, що міститься у віброакустичному сигналі. Як діагностичні ознаки тут використовують характеристики віброакустичного сигналу, що супроводжують функціонування ГТД [31, с. 45]. Контроль віброакустичних параметрів припускає застосування різних типів віброперетворювачів і сигнальної апаратури. При цьому розробляються і застосовуються методи оцінки напруження конструктивних елементів за допомогою голографічних установок (створення “вібропортретів”).

Як правило, рівень вібрацій двигуна контролюється за допомогою віброперетворювачів, які сигналізують про можливу несправність у польоті, але не дають змоги визначити конкретне місце її розвитку. При стендових випробуваннях для отримання інформації про вібронапруженість та коливання лопаток робочих коліс компресора використовують безконтактні дискретно-фазові методи. Їх застосування потребує жорсткого закріплення двигуна на стенді й установки на корпусі та роторі компресора спеціальних віброперетворювачів. При обробці інформації сукупність згаданих параметрів пов’язують із станом об’єкта  $W(t)$  у момент (період) часу  $t$  [32, с. 92]. При цьому безліч можливих станів об’єкта ділять на дві підмножини. Підмножина  $W^*$  є сукупністю працездатних станів, які мають запас працездатності. Підмножина  $W^{**}$  включає всі стани, що відповідають появі відмов у роботі двигуна.

Для постановки діагнозу всі можливі стани розбиваються на кілька класів  $W_i$ ,  $i=1...n$ , які підлягають розпізнаванню. Але якщо число класів у підмножині  $W^{**}$  визначається числом можливих відмов, то практично здійснити класифікацію за ступенем працездатності в підмножині  $W^*$  не є можливим через безперервність зміни цих станів у просторі діагностичних ознак і часу. Крім того, така класифікація утруднена багатопараметричністю об’єкта, яким є газотурбінний двигун. Якщо дефект супроводжується підвищеною віброактивністю, важливим тут є локалізація джерел підвищеного рівня коливальної енергії. При цьому розрізняють два можливі варіанти: джерела шуму незалежні чи статистично пов’язані. Рівень труднощів, зумовлений необхідністю поділу впливу джерел, значною мірою знижує інформативність вібродіагностики ГТД.

Важливим моментом є формування еталонів, які є усередненими для даного класу значеннями

ознак. За допомогою набору класифікуючих функцій проводиться розпізнавання параметрів віброакустичного сигналу. У підсистемі прийняття рішення визначається фактичний стан об’єкта контролю за поточними значеннями параметрів, що можуть бути використані як вихідні при побудові алгоритмів прогнозу можливих відмов. Незважаючи на перелічені заходи, все ж таки значні труднощі викликає вирішення задачі локалізації джерел випромінювання підвищеної віброактивності [33, с. 44].

Взагалі методи віброакустичної діагностики ГТД базуються на загальних принципах діагностики технічних систем за непрямыми (загалом малоінформативними) параметрами. До того ж, область їх застосування обмежена можливістю доступу до двигуна, а також недосконалістю засобів діагностики та математичних моделей, що пов’язують структурні параметри з діагностичними ознаками. Тим не менш, у ряді випадків можна отримати кількісну оцінку запасу працездатності вузлів двигуна за результатами вимірювання віброакустичних сигналів, що дає змогу прогнозувати величини залишкових ресурсів елементів ГТД [28, с. 60].

Одним з перспективних методів віброакустичної діагностики є, на наш погляд, метод контролю технічного стану робочих лопаток турбомашин на зрізі сопла [6], який вже досить успішно застосовується при експлуатації авіаційних ГТД радянського виробництва.

Метод полягає у вимірюванні акустичних характеристик газових струменів на зрізі вихідних пристроїв ГТД (акустичних характеристик аеродинамічного шуму по площині струменя). За вихідними сигналами роблять висновок про зміни вихідних акустичних параметрів у всьому діапазоні частот від еталонних, за якими, у свою чергу, визначають наявність характерних дефектів. Вимірювання акустичних параметрів проводять одночасно по всій площині зрізу сопла за допомогою аероакустичної антени. Цю антену, яка являє собою дифракційну решітку, що складається з волоконно-оптичних датчиків, встановлюють нерухомо в площині, яка є перпендикулярною газовому струменю та співвісною з нею, при цьому збільшують частоту вимірювання по периферії за рахунок зменшення кроку решітки до її периферії [6; 12].

Поряд з описаними вище методами контролю та діагностики АТ найбільш загальну та оперативну інформацію про стан відповідальних вузлів і деталей двигуна, таких як лопатки компресора і турбіни, камери згоряння, диски, зварні шви корпусів тощо дають оптичні методи контролю з використанням бороскопів, фіброскопів та

ендоскопів [28, с. 74...79]. Цими приладами успішно виявляється велика група дефектів типу: тріщин, прогарів, короблення (порушення макрогеометрії деталей), корозії, ерозії, вироблення контактних поверхонь, зношення елементів лабіринтних ущільнень, нагароутворення та ін.

Перша група приладів – це прямі ендоскопи з лінзовою оптикою, торцевим та бічним зором, з прямими та кутовими окулярами. Ці прилади розрізняються за діаметром та довжиною робочої частини. У них різні оптичні характеристики та різна механізація.

Ендоскопи призначені для огляду та виявлення поверхневих дефектів (тріщин, вибоїн, ризик тощо) на робочих лопатках всіх ступенів компресора та турбін двигунів в експлуатації. Конструкція приладу дає змогу оператору, не змінюючи свого положення, оглядати всі поверхні навколо робочої частини ендоскопа. При підготовці до роботи прилад підключають до джерела електричного струму і через оглядовий лючок вводять в корпусі в проточну частину двигуна.

До другої групи приладів можна віднести ендоскопи з одним або декількома рухомими ланками, з'єднаними між собою універсальними оптичними шарнірами. Їхньою відмінністю є можливість огляду криволінійних каналів.

До третьої групи діагностичних приладів відносяться волоконно-оптичні ендоскопи з гнучкою робочою частиною. Представником цієї групи є відеоендоскоп Series C Olympus, який вже використовують у військових частинах для перевірки жарових труб, торців паливних форсунок і торців свічок, лопаток СА та робочих лопаток газоповітряного тракту двигуна. Недоліком цього відеоендоскопу є те, що при перевірці робочих лопаток компресора та турбіни низького та високого тиску не забезпечується огляд кромки лопатки. Також неможливо оцінити розміри пошкоджень (немає камери з лінійкою (шкалою), немає жорсткої насадки ендоскопу з поворотом підсвічування та камери на 90°).

Інформативність розглянутих методів дуже висока. Оптичні засоби контролю добре зарекомендували себе в експлуатації. Ендоскопи, що застосовуються при діагностиці ГТД в експлуатувальних частинах, мають досі високі технічні характеристики, але застосовуючи новітні розробки (прилади та засоби) в галузі ендоскопії можливо покращити результати діагностики проточних частин двигунів.

Також широко застосовується термогазодинамічна діагностика [28, с. 71...73]. Відповідно до загальноприйнятих концепцій до термогазодинамічних параметрів відносять: тиск, температуру, відношення тисків і температур,

швидкість течії, витрата палива та масла, прохідні площі перерізів проточної частини, тягу, а також частоту обертання роторів.

Але інформативність термогазодинамічної діагностики ГТД є невисокою [28, с. 71].

Загальні підходи тут не відрізняються від підходів, які застосовуються, наприклад, під час вібродіагностування. Є лише деякі специфічні відмінності. Зазвичай при термогазодинамічному діагностуванні ГТД застосовується метод математичного моделювання “поведінки” перерахованих вище параметрів у процесі роботи двигуна. Розрізняють детерміновані, ймовірнісні та комбіновані моделі ГТД.

У детермінованих моделях усі взаємозв'язки, змінні та константи задаються точно (що дуже складно при профілактиці відмов). Ця умова забезпечує можливість однозначного визначення результуючої функції.

У моделях ймовірності задаються відповідні закони розподілу випадкових величин, що призводить до ймовірнісної оцінки цієї функції. Найчастіше застосовують детерміновані моделі. Тут ознаками стану двигуна можуть бути: тяга  $R$ , витрата палива  $C_r$ , температура газів перед турбіною або за турбіною, параметри робочого тіла по тракту, параметри паливної, масляної систем тощо. Прикладами можливих несправностей можуть бути прогари лопаток турбіни, жарової частини камер згоряння, деформація елементів проточної частини тощо. Рішення приймаються за критичними відхиленнями термогазодинамічних параметрів.

Зміну температури газу за турбіною порівнюють із еталонною математичною моделлю. Еталонна модель будується за вихідними формулярними даними двигуна. Температура контролюється на злітному режимі, якому відповідає контрольна температура за турбіною.

Певні можливості закладено у діагностичний параметр “витрата палива”. Досвід показує [34, с. 184], що пошкодження проточної частини ГТД збільшує витрату палива на 120...150 кг/год за одночасної зміни інших термодинамічних параметрів.

Витрата палива досить добре відображає стан камер згоряння та соплових апаратів турбін. Однак, точне вимірювання витрати утруднено через похибки витратомірів, викликаних необхідністю обліку щільності гасу при різних температурах.

У певних умовах діагностику ГТД можна здійснювати і за тиском палива перед форсунками  $P_f$ , але тут похибки вимірювань можуть грати вирішальну роль.

Для мінімізації похибок оцінки стану ГТД за результатами вимірювань термогазодинамічних

параметрів значення параметрів призводять до стандартних умов, а їх вимірювання повинно проводитися на одних і тих же висотах і режимах роботи двигуна.

Результати досліджень у галузі термогазодинамічної діагностики ГТД дали змогу встановити, що найчутливішим та інформативним показником стану проточної частини двигунів є адіабатичний ККД турбіни  $\eta_m$  [34, с. 202]. Звичайно, безпосередньо заміряти  $\eta_m$  неможливо, однак його можна виразити через частоту обертання роторів, ступінь підвищення тиску  $\pi_k$  і температуру газів перед турбіною  $T_e^*$ . Ця залежність буде емпіричною та специфічною по відношенню до даного типу двигуна.

Детерміновані моделі діагностування ГТД можуть виражатися через систему рівнянь стану двигуна, вирішивши яку можна сформувати діагноз, здійснити прогноз і дати рекомендації щодо запобігання або усунення можливої відмови. Діагностичні рівняння є кінцевою множиною виразів, побудованих для збільшення витрати повітря, температури газу перед турбіною, питомої витрати та інших термогазодинамічних параметрів.

У правій частині цих рівнянь містяться відхилення параметрів, які визначають шляхом порівняння поточних значень з еталонними значеннями (за певного режиму роботи двигуна).

Найбільш відповідальним етапом термогазодинамічного діагностування ГТД є складання діагностичних рівнянь. Число діагностичних рівнянь визначається класами можливих станів ГТД.

Таким чином, у статті розглянуті найбільш інформативні методи технічної діагностики. З розгляду можливо зробити рекомендації щодо ширшого впровадження в практику діагностики авіаційних ГТД радянського виробництва, які експлуатуються у державній авіації України.

## Висновки

У статті розглянуто основні існуючі методи технічної діагностики авіаційних газотурбінних двигунів.

Визначено, що для діагностики ГТД доцільно використовувати методи та параметри, що мають максимальну інформативність. Проаналізовано перспективні з точки зору інформативності методи технічної діагностики.

Зазначено, що для підвищення ступеня визначення технічного стану двигунів потрібно застосовувати поєднання різноманітних методів і засобів діагностики. Запропоновано розширити перелік застосовуваних в експлуатації методів діагностики за рахунок сучасних методів діагностики: рентгеноспектральному, емісійно-спектральному та сцинтиляторного методів трибодіагностики, методу вимірювання акустичних характеристик газового струменю на зрізі сопла та сучасних ендоскопічних засобів.

Впровадження запропонованих методів у практику діагностики ГТД є актуальним науковим і практичним завданням.

**Напрями подальших досліджень.** Подальші дослідження авторів будуть зосереджені на питаннях впровадження та застосування запропонованих методів технічної діагностики при визначенні технічного стану окремих типів двигунів.

## Список літератури

1. Li J. Research Progress on Typical Fault Monitoring and Diagnosis of Aircraft Engine / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 772 (2020) 012030. doi:10.1088/1757-899X/772/1/012030.
2. Менчиков Р.В., Панкеев Е.С., Парпуц А.А. Методы технического диагностирования авиационных двигателей // Решетневские чтения. 2018. С. 413-414.
3. Скороход А.Ю. Анализ методов диагностики авиационного двигателя // Мат-ли IX наук.-техн. конф., 17-18.04.2013. Київ. С. 500-503.
4. Машошин О.Ф., Зонтов Г.С. Диагностика авиационного газотурбинного двигателя по наличию вредных примесей в системе кондиционирования воздуха / Научный вестник МГТУ ГА. № 205. 2014. С. 44-48.
5. Ntantis E.L., Botsaris P.N. Diagnostic Methods for an Aircraft Engine Performance // Journal of Engineering Science and Technology Review. № 8. 2015. P. 64-72.
6. Виноградов В.Ю., Сайфуллин А.А. Контроль технического состояния авиационных ГТД по акустическим параметрам, измеренным на срезе сопла двигателя // Вестник двигателестроения. № 2. 2012. С. 25-29.
7. Simon D.L., Borguet S., Leonard O., Zhang X. Aircraft Engine Gas Path Diagnostic Methods: Public Benchmarking Results // NASA/TM-2013-218082. P. 1-22.

8. Bouraou N., Sopilka I. Vibroacoustical diagnosis of the crack-like damages of aircraft engine blades at the steady-state and non-steady-state modes // XXIV Symposium Vibrations in Physical Systems, Poznan-Bedlewo, May 12-15, 2010.
9. Зінковський А.П. Актуальні проблеми динаміки та міцності в сучасному авіаційному двигунобудуванні // Вісн. НАН України. 2017. № 6. С. 23-30.
10. Митрахович М.М. Использование вейвлет-преобразования в задачах диагностирования технического состояния газотурбинных двигателей // Журнал "Технологические системы". № 3. 2014. С. 22-26.
11. Учанин В.Н., Дереча В.Я. Вихретоковый метод выявления поверхностных дефектов узлов авиационной техники в условиях эксплуатации // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. № 4. 2006. С. 20-28.
12. Виноградов В.Ю. Аэроакустическая картография как метод неразрушающего контроля параметров потока на срезе сопла турбомашин с использованием волоконно-оптических технологий. Постановка задачи // Инженерный вестник Дона. № 3 (2018).
13. Pérez-Ruiz J.L., Tang Y., Loboda I. Aircraft Engine Gas-Path Monitoring and Diagnostics Framework Based on a Hybrid Fault Recognition Approach // Aerospace 2021, 8, 232. doi:10.3390/aerospace8080232.
14. Rabenoro T., Lacaille J., Cottrell M., Rossi F. A Methodology for the Diagnostic of Aircraft Engine Based on Indicators Aggregation // Proceedings of the 14th Industrial Conference, ICDM 2014, St. Petersburg, pp.144-158.
15. Li B., Zhao Y. Simultaneous fault diagnosis for aircraft engine using multi-label learning // Proc IMechE Part I: J Systems and Control Engineering. Vol. 236 (7). P. 1355-1371.
16. De Giorgi M., Menga N., Ficarella A. Exploring Prognostic and Diagnostic Techniques for Jet Engine Health Monitoring: A Review of Degradation Mechanisms and Advanced Prediction Strategies // Energies 2023, 16, 2711. doi:10.3390/en16062711.
17. Угрюмова Е.М., Трончук А.А., Меняйлов А.В., Афанасьевская В.Е. Применение эволюционных методов для оценки параметров узлов газотурбинных двигателей на основе данных измерений в процессе эксплуатации // Пробл. Машиностроения. 2010. Т. 13. № 2. С. 68-76.
18. Шмелев Ю.Н., Крышан А.Ф. Применение нейросетевых технологий в системе контроля технического состояния авиационного двигателя ТВ3-117 в полетных режимах // Радиотехника. 2018. Вып. 194. С. 147-154.
19. Герасимов А.Б., Сундуков М.Ю. Численное исследование возможности достоверной диагностики газотурбинного двигателя по газодинамическим параметрам с использованием линейной математической модели // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. № 3 (27). 2011. С. 29-36.
20. Субботин А.С. Обработка стационарных сигналов в задаче диагностирования лопаток газотурбинных авиадвигателей // Вестник двигателестроения № 1/2014. С. 156-160.
21. Владов С.І., Шмельов Ю.М., Пилипенко Л.М., Подгорних Н.В., Назаренко Н.П., Тутова Н.В., Дерябіна І.О. Контроль і діагностика технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 із застосуванням модернізованих методів найменших квадратів й зрівнювання // Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Том 31 (70). Ч. 1. № 1. 2020. С. 14-20.
22. Дубровин В.И., Субботин С.А., Богуслаев А.В., Яценко В.К. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей: Монография. Запорожье: ОАО "Мотор-Сич". 2003. 279 с.
23. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеєв, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов. М.: Высш. шк. 2002. 355 с.
24. Киселев Ю.В., Епишев Н.И. Диагностика газотурбинных двигателей и их узлов по термогазодинамическим и виброакустическим параметрам. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 200 с.
25. Машошин О.Ф. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей с использованием информационного потенциала контролируемых параметров. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МГТУ ГА. 2005. 31 с.
26. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр. 2009. 544 с.
27. Пивоваров В.А. Прогрессивные методы технической диагностики. М.: МГТУ ГА. 1999. 134 с.
28. Машошин О.Ф. Диагностика авиационной техники. М.: МГТУ ГА. 2007. 141 с.
29. Ермаков Г.И. Диагностирование технического состояния АД путем анализа работавшего масла. М.: Изд-во МГА. 1985. - 176 с.
30. Пивоваров В.А. Повреждаемость и диагностирование авиационных конструкций. М.: Транспорт. 1994. - 208 с.
31. Дорошко С.М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам. М.: Транспорт. 1984. - 129 с.
32. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов. М.: Энергия. 1979. - 240 с.
33. Карасев В.А., Максимов В.П., Сидоренко М.К. Вибрационная диагностика ГТД. М.: Машиностроение. 1978. - 132 с.
34. Казанджан П.К., Тихонов Н.Д., Шулекин В.Т. Теория авиационных двигателей. М.: Транспорт. 2000. - 286 с.

*Надійшла до редколегії 24.10.2023*

*Схвалена до друку 27.12.2023*

**Відомості про авторів:**

**Внуков Андрій Володимирович**

кандидат технічних наук  
провідний науковий співробітник  
Державного науково-дослідного інституту авіації,  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-0534-4318>

**Челобітченко Олександр Олександрович**

кандидат технічних наук  
старший науковий співробітник  
провідний науковий співробітник  
Державного науково-дослідного інституту авіації,  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-9411-2569>

**Грень Віталій Миколайович**

старший науковий співробітник  
Державного науково-дослідного інституту авіації,  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0001-8920-2351>

**Information about the authors:**

**Andrii Vnukov**

Candidate of Technical Sciences  
Leading Researcher  
of State Research Institute of Aviation,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-0534-4318>

**Oleksandr Chelobitchenko**

Candidate of Technical Sciences  
Senior Researcher  
Leading Researcher  
of State Research Institute of Aviation,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-9411-2569>

**Vitalii Gren**

Senior Researcher  
of State Research Institute of Aviation,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-8920-2351>

**SELECTION OF METHODS FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS OF AVIATION GAS TURBINE ENGINES**

*A. Vnukov, O. Chelobitchenko, V. Gren*

*The article discusses the primary existing methods for the technical diagnosis of aviation gas turbine engines. Ensuring the safe operation of an aging engine fleet, mostly characterized by low controllability, is possible only through extensive application of various technical diagnostic methods, including the integration of cutting-edge developments in this field.*

*There are numerous means and methods for the technical diagnosis of engines. However, none of these methods individually offers the capability to assess the engine's condition with sufficient detail, as they carry specific information of varying importance. Addressing diagnostic tasks (determining whether an object is in a functional or dysfunctional state) is always associated with the risk of false alarms or defects being missed. Combining a series of methods enables a deeper inspection of the engine's technical condition.*

*The article analyzes prospective diagnostic methods in terms of informativeness: thermal methods, tribodiagnostics (oil sample analysis), endoscopic methods, vibroacoustic methods, and methods based on thermogasdynamic parameters.*

*It identifies modern diagnostic methods: X-ray spectroscopy, emission spectroscopy, and scintillation methods for tribodiagnostics, methods measuring acoustic characteristics of the gas stream at the nozzle cross-section, and contemporary endoscopic tools proposed for inclusion in the list of diagnostic methods used by technical diagnosis experts in operational departments.*

*Keywords: technical diagnostics, aviation gas turbine engine, technical condition, diagnostic method.*