

УДК 621.438

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2023.4\(493\).6](https://doi.org/10.15589/znп2023.4(493).6)

INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE CONDITION OF THE GTE COMBUSTION CHAMBER FLAME TUBE USING THERMAL INDICATOR PAINTS AND THERMOCOUPLES

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ ЖАРОВОЇ ТРУБИ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД ТЕРМОІНДИКАТОРНИМИ ФАРБАМИ ТА ТЕРМОПАРАМИ

Vitalii V. Savushkin

vvsavushkin.science@gmail.com

ORCID: 0009-0000-4465-6325

В. В. Савушкін,

аспірант

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. One of the indicators of the economic efficiency of a gas turbine engine (GTE) is the service life of its individual components, especially those that have to be replaced during routine maintenance, i.e. the “consumables”. Extending the service life of such elements before they are replaced or repaired reduces the number of routine maintenance activities, which in turn reduces the cost of shutting down and restarting the GTE and also reduces the likelihood of accidents. Examples include turbine blades, combustion chamber components, bearings, lubrication and cooling system components, etc. One of the factors limiting the life of the above elements is the direct operating conditions, which may be caused by the engine operating processes or the test bench operating conditions. Wear of the GTE elements caused by engine operation is most often physical destruction under the influence of thermal or mechanical stress. Therefore, when developing or upgrading parts or assemblies of the GTE, special attention is paid to the study of resistance to temperature and mechanical stress. Experimental investigation of the thermal condition of GTE components and assemblies allow timely changes to be made to the engine design before it enters service, resulting in increased service life and reduced likelihood of GTE component deformation. The scope of the article is a practical investigation of the levels of thermal stress on the inner surface of the combustion chamber flame tube during full-scale tests and nominal operating conditions of a gas turbine engine. The article considers promising methods of temperature measurement and proposes methods for assessing the temperature state of the flame tube surface with the possibility of detecting its overheating zones using thermal indicator paints. To achieve the objective of the investigation, a new methodology is proposed to construct a temperature map of the inner surface of the combustion chamber flame tube. The scheme and characteristics of the experimental investigation are presented. The results of the temperature measurements are analyzed and the indicators representing the deficiencies found during the tests are given. Practical recommendations for the use of thermal indicator paints in gas turbine construction are given.

Key words: gas turbine engine; combustion chamber; flame tube; heat load; thermal indicator paint; thermocouple.

Анотація. Одним з показників економічної ефективності газотурбінного двигуна (ГТД) є ресурс роботи його окремих елементів, особливо тих, які підлягають заміні при виконанні регламентних робіт, тобто є «витратними матеріалами». Подовження ресурсу до заміни або ремонту таких елементів зменшує кількість регламентних робіт, що зменшує витрати на виведення-введення в експлуатацію ГТД та зменшує вірогідність аварійних випадків. Прикладами таких елементів є робочі лопатки турбін, елементи камери згорання, підшипники, елементи систем змащування та охолодження, тощо. Одним із чинників обмеження ресурсу наведених елементів є безпосередні умови експлуатації, які можуть обумовлюватися робочими процесами двигуна або експлуатаційними умовами стенду. Зношення елементів ГТД, обумовлене робочими процесами двигуна, найчастіше носить характер фізичного руйнування під впливом теплового або механічного навантаження. Саме тому при розробці або модернізації деталей чи вузлів ГТД особливу увагу приділяють дослідженню стійкості до температурних та механічних навантажень. Експериментальні дослідження теплового стану елементів деталей та вузлів ГТД, дозволяють своєчасно вносити зміни в конструкцію двигуна до введення його в експлуатацію, що приводить до збільшення ресурсу та зменшує вірогідність появи деформацій елементів ГТД. Метою статті є практичне дослідження рівнів теплового навантаження внутрішньої поверхні жарової труби камери згорання при натурних випробуваннях та номінальних режимах роботи газотурбінного двигуна. Розглянуто перспективні методи вимірювання температур

та запропоновано способи оцінки температурного стану поверхні жарової труби з можливістю виявлення зон її перегріву використанням термоіндикаторних фарб. Для досягнення мети дослідження запропоновано нову методику побудови температурної карти внутрішньої поверхні жарової труби камери згорання. Представлено схему та особливості проведення експериментального дослідження. Проаналізовано результати вимірювання температур, приведено показники, які характеризують виявлені недоліки при випробуваннях. Надано практичні рекомендації щодо використання термоіндикаторних фарб в газотурбобудуванні.

Ключові слова: газотурбінний двигун; камера згорання; жарова труба; теплове навантаження; термоіндикаторна фарба; термоелектричний перетворювач.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

За сучасних ринкових умов розробка, виготовлення, доведення та впровадження новітніх газотурбінних двигунів є дуже трудомістким та витратним процесом. Саме тому, абсолютна більшість підприємств, що займаються виготовленням ГТД, велику увагу приділяють підвищенню надійності та ефективності роботи існуючих типів та конфігурацій двигунів, таким чином розширяючи ринок збуту та скорочуючи витрати на позапланові ремонти ГТД, що знаходяться в експлуатації.

Одним з найважливіших показників якості ГТД є ресурс його роботи між запланованими регламентованими чи ремонтними роботами. Камера згорання (КЗ) є одним з ключових вузлів ГТД, елементи якої постійно знаходяться під впливом великих динамічних та теплових навантажень. Жарова труба (ЖТ) забезпечує ключову функцію КЗ, а саме згорання паливо-повітряної суміші. Отже, стінки ЖТ знаходяться від високим тепловим навантаженням, яке треба враховувати на етапі розробки двигуна та досліджувати при натурних випробуваннях.

Експериментальні дослідження теплового стану ЖТ та виявлення зон перегріву їх внутрішніх стінок, дозволяють своєчасно внести зміни в конструкцію двигуна до введення його в експлуатацію, що приводить до збільшення ресурсу та зменшує вірогідність появи розтріскування, деформацій і навіть руйнування елементів КЗ.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В сучасному світі при постійному збільшенні споживачів різного виду енергії та безперервного розвитку технологій, неодмінно виникає питання про необхідність генерації достатньої кількості потужності. В багатьох галузях промисловості та виробництва це питання розв'язується саме за рахунок використання газотурбінних двигунів у складі енергетичних установок. Великі витрати енергії повинні постійно компенсуватися збільшенням потужності її генерації. Зростання потужності вирішується збільшенням або кількості задіяних для цього установок та двигунів, або потужностей самих установок [1].

Найчастіше для проектування ГТД великої потужності використовується проєкт вже введенного в експлуатацію менш потужного двигуна. І в цьому процесі використовують рішення, які пройшли апробацію і мають практичний результат. Не виключенням

є проєктування нової камери згорання двигуна або модернізація вже існуючої та її основних елементів [2].

Виготовлена чи модернізована камера згорання, або її окремий елемент, проходить стендові випробування, доопрацьовується та переходить до етапу натурних випробувань у складі ГТД. Натурні випробування дозволяють оцінити ефективність втілених новацій та, безперечно, надійність роботи самого елемента чи камери згорання в цілому.

Окрім визначення ефективності роботи жарової труби, як одного з основних елементів камери згорання, дуже важливо оцінювати надійність її роботи, правильність вибору конструкційних матеріалів, ефективність роботи системи охолодження, тощо.

Саме для цього необхідно мати не лише розрахункові дані теплового стану стінок жарової труби [3], а й експериментально вимірювати фактичні величини температур [4]. Також треба розуміти, що при стендових випробуваннях не можливо врахувати всі чинники впливу параметрів робочого процесу на працездатність камери згорання, саме тому проводять натурні випробування.

При стендових випробуваннях для визначення температури стінки жарової труби найчастіше використовують термоелектричні перетворювачі (термопари), тепловізори, пірометри та навіть люмінофору термометрію [5]. Але зазвичай використання цих методів можливо саме при відносно вільному доступі до жарової труби в умовах випробувального стенду [6].

В умовах натурних випробувань для вимірювання температур жарових труб найчастіше використовують тільки термопари. Оскільки при повному збиранні ГТД обмежується візуальний контроль за об'єктом дослідження, тому ускладнюються можливості зміни положення датчиків температури. Окрім того, термопари розташовують на зовнішній поверхні жарових труб, оскільки внутрішнє розміщення потребує додаткового їх захисту і доопрацювання конструкції жарової труби для виведення вимірювальних дріотів.

Аналізуючи опубліковані роботи з тематики вимірювання температур стінок жарових труб газотурбінних двигунів, можливо зробити висновок, що абсолютна їх більшість виконана саме в умовах експериментальних стендів, а не при натурних випробуваннях ГТД.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проведений аналіз останніх досліджень з цієї тематики дає можливість оцінити переваги і недоліки

різноманітних методів вимірювання температур стінок жарових труб ГТД в умовах різних видів випробувань. Даний аналіз дозволив виявити невирішені раніше питання щодо фактичної оцінки температурного стану внутрішньої стінки жарової труби газотурбінного двигуна. Розширення уявлень про можливості вимірювання температур стінок жарових труб використанням термоіндикаторних фарб дозволить поглибити знання теплових процесів, що відбуваються в камері згорання ГТД, шляхом співставлення результатів, отриманих, як при натурних, так і стендових випробуваннях, а також модернізувати систему експериментальних досліджень.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є експериментальне дослідження теплового стану внутрішньої поверхні жарової труби камери згорання при натурних випробуваннях і номінальному режимі роботи газотурбінного двигуна.

В якості об'єкта дослідження обрано робочі процеси в жаровій трубі камери згорання ГТД, яка проходить натурні випробування після модернізації чи ремонту. Предмет дослідження - тепловий стан внутрішніх стінок жарових труб з виявленням зон перегріву поверхонь.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Підготовка та проведення випробувань

Для можливості оцінки температур поверхонь жарової труби, отриманих застосуванням термоіндикаторних фарб (ТФ), використано два методи вимірювання температур: за допомогою термопар, розміщених на зовнішній поверхні ЖТ, і за допомогою термоіндикаторної фарби, нанесеної на внутрішню поверхню ЖТ.

В якості термопар використано хромель-алюмелеві термопари типу К з діапазоном вимірювання температур від мінус 270°C до плюс 1370°C. В якості термоіндикаторної фарби використано ТФ типу MC 470-9 фірми KAGER з дев'ятьма температурними переходами та діапазоном вимірювання температур від плюс 470°C до плюс 1210°C. Значення температур температурних переходів взято з каталогу фірми KAGER [7] та наведено у Кельвінах в табл. 1. Градування ТФ виконано з використанням спеціальних засобів згідно унікально розробленої методики.

Таблиця 1. Температурні переходи ТФ типу MC 470-9 фірми KAGER

Тип MC 470-9 – початковий колір: помаранчевий/рудий			
Час переходу, хв	Температура спрацювання, К	Номер температурного переходу	Колір температурного переходу
5	743	1	Коричневий
	943	2	Жовтий
	1023	3	Зелений
	1123	4	Помаранчевий
	1183	5	Мармурово-червоний
	1313	6	Сіро-зелений
	1353	7	Сірий
	1473	8	Матово-чорний
	1483	9	Глянцевий чорний

Схема препарування ЖТ термопарами наведена на рис. 1. Для візуального уявлення про укладення вимірювальних дротів від термопар (ТП) на рис. 2 показано фотографію препарованої ЖТ.

Нанесення ТФ на зовнішню поверхню жарової труби з встановленими термопарами не є раціональним та ускладнено наявністю кріплень вимірювальних дротів від термопар. Тому ТФ нанесено тільки на внутрішню поверхню жарової труби. Для візуалізації початкового кольору ТФ, що нанесена на поверхню ЖТ, на рис. 3 представлено відповідну фотографію.

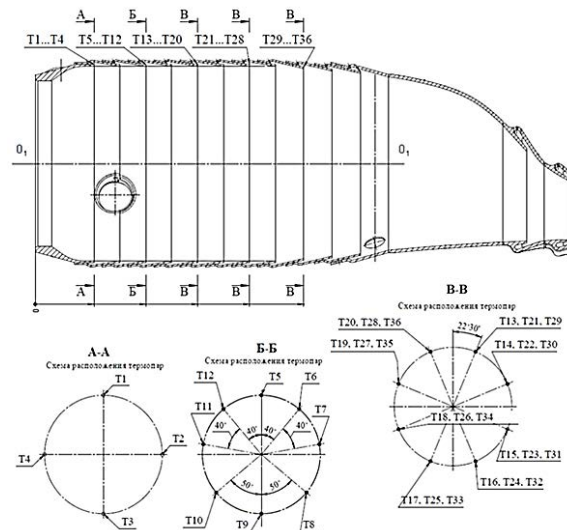


Рис. 1. Схема препарування жарової труби



Рис. 2. Загальний вигляд жарової труби, препарованої термопарами



Рис. 3. Початковий колір ТФ, нанесеної на внутрішню поверхню ЖТ

Після препарування ТП та нанесення ТФ на поверхні жарової труби, ЖТ було змонтовано згідно карти монтажу ГТД в штатному виконанні з виводом вимірювальних дрітків від ТП за межі КЗ.

Після монтажу ГТД на випробувальному стенді виконано підключення вимірювальних дрітків ТП до апаратури вимірювання температур із слідкуємим записом трендів. ГТД проходив випробування згідно розробленої програми з роботою на номінальних режимах навантаження на протязі 14 хв. 51 сек.

Результати вимірювання температур поверхні жарової труби

Оскільки термоіндикаторні фарби змінюють кольори переходів при досягненні максимальних температур нагріву і не мають зворотного перетворення, то при аналізі трендів запису температур, виміряних ТП, було знайдено режим максимального теплового навантаження на жарову трубу. Результати вимірювання температур використанням ТФ з розшифруванням значень наведено на рис. 4. Величини температур, виміряних ТП та округлених до цілих значень, відображено в табл. 2.

Таблиця 2. Результати вимірювання температур поверхні ЖТ термопарами

№ ТП	Значення, К	№ ТП	Значення, К	№ ТП	Значення, К
1	968	13	1105	25	1157
2	926	14	1161	26	1124
3	894	15	1113	27	1098
4	918	16	1169	28	1094
5	1093	17	1143	29	1081
6	1116	18	1106	30	1110
7	1127	19	1058	31	1131
8	1174	20	1076	32	1110
9	1126	21	1113	33	1127
10	1030	22	1118	34	1093
11	1101	23	1147	35	1036
12	1114	24	1170	36	1025

Аналіз результатів вимірювання температур поверхонь жарової труби

Аналіз результатів вимірювання температур внутрішньої стінки жарової труби з використанням ТФ дозволяє виявити зони перегріву та побудувати температурну карту ЖТ.

Представляє інтерес співставлення температур, виміряних різними методами на одній і тій же ділянці поверхні ЖТ, але з різних її сторін. Для відображення місць розташування ТП на поверхні ЖТ будемо використовувати схему препарування (рис. 1), а також дані рис. 4. Внутрішня поверхня ЖТ з розташуванням точок препарування наведена на рис. 5.

Використовуючи рис. 4–5 і табл. 2 зведемо дані вимірювання температур поверхні ЖТ різними методами в загальну табл. 3.

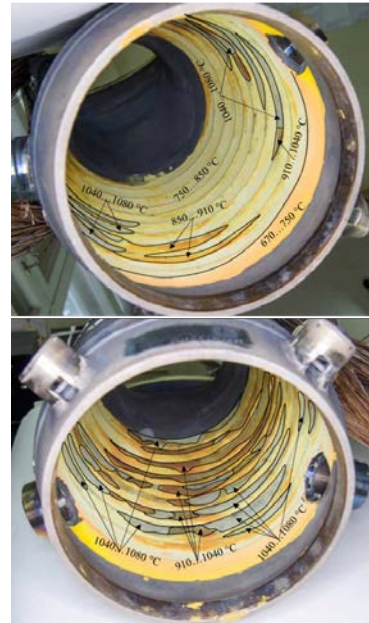


Рис. 4. Внутрішня поверхня ЖТ (два види, отримані при повороті на кут 180°)



Рис. 5. Внутрішня поверхня ЖТ з розташуванням точок препарування ТП

З табл. 3 можна побачити, що тільки 6 із 36 значень температур, виміряних ТП, потрапляють у температурний діапазон кольорових переходів ТФ. Цей факт чітко показує зниження значень показів температур, заміряних термопарами. Неможливо визначити абсолютне середнє значення зниження температур, але мінімальне середнє значення зниження температур складає 67,4 К при максимальному відхиленні 212 К і мініальному 5 К.

Таблиця 3. Співставлення значень температур поверхні ЖТ, виміряних різними методами

№ ТП	Значення ТП, °К	Діапазон ТФ, К	Мінімальна різниця в показах, К
Переріз А-А			
1	968	1023-1123	- 55
2	926	943-1023	- 17
3	894	943-1023	- 49
4	918	943-1023	- 25
Переріз Б-Б			
5	1093	1123-1183	-30
6	1116	1123-1183	-7
7	1127	1313-1353	-186
8	1174	1313-1353	-139
9	1126	1183-1313	-57
10	1030	1023-1123	7
11	1101	1313-1353	-212
12	1114	1183-1313	-69
Переріз В-В			
13	1105	1123-1183	-18
14	1161	1313-1353	-152
15	1113	1313-1353	-200
16	1169	1313-1353	-144
17	1143	1183-1313	-40
18	1106	1183-1313	-77
19	1058	1123-1183	-65
20	1076	1123-1183	-47
21	1113	1123-1183	-10
22	1118	1123-1183	-5
23	1147	1183-1313	-36
24	1170	1183-1313	-13
25	1157	1183-1313	-26
26	1124	1183-1313	-59
27	1098	1023-1123	75
28	1094	1023-1123	71
29	1081	1023-1123	58
30	1110	1123-1183	-13
31	1131	1183-1313	-52
32	1110	1183-1313	-73

№ ТП	Значення ТП, °К	Діапазон ТФ, К	Мінімальна різниця в показах, К
33	1127	1183-1313	-56
34	1093	1183-1313	-90
35	1036	1023-1123	13
36	1025	1023-1123	2

ВИСНОВКИ

Використання термоіндикаторних фарб для визначення зон перегріву і побудови температурних карт є доцільним і ефективним методом, що дозволяє в подальшому розробляти більш точні схеми препарування деталей та вузлів ГТД для визначення абсолютних значень температур.

Вдосконалено методику виявлення зон перегріву внутрішньої поверхні жарової труби камери згорання ГТД використанням термоіндикаторних фарб.

Проведено експериментальне дослідження температурного стану внутрішньої стінки жарової труби різними методами при натурних випробуваннях: за допомогою термопар та термоіндикаторних фарб. У результаті отримано нові дані з вибору раціональних методів виявлення зон перегріву елементів камери згорання без використання прямих методів вимірювання температур.

Використання термопар, встановлених на зовнішній стороні стінки жарової труби, поза зоною горіння паливно-повітряної суміші, призводить до вимірювання занижених температур, що обумовлено наявністю термо-бар'єрного покриття на внутрішній стінці жарової труби та інтенсивного зовнішнього охолодження.

Таким чином, отримані експериментально значення градієнтів температур стінки жарової труби, виміряних з використанням термоіндикаторних фарб і термопар, дозволяють виконувати корекцію температурного стану жарової труби, зменшуючи вартість досліджень та необхідну кількість самих термопар у контрольних випробуваннях.

REFERENCES

- [1] Khalatov, A.A., Yuschenko, K.A., Isakov, B.V., Dashevskiy, Yu.Ya., Shevtsov, A.P. (2013) Gazobuduvannya v Ukrainy: suchasniy stan i perspektivi rozvitku [Gas construction in Ukraine: current state and development prospects]. *Visnyk NAN Ukrainy*. № 12, pp. 40-48.
- [2] Varlamov, G.B., Poznjakov, P.O., Jurashev, D.M. (2012) Kompleksni doslidzennya energoekologichnikh pokaznikov ekspluatatsii GTU u skladi gazoperekachuvalnogo agregatu nipu GTK-10 [Comprehensive investigations of the energy and environmental performance of the GTU as part of the GTU-10 gas package unit]. *Energoberegenie*. №01(95), pp. 15-24.
- [3] Baranuk, O.V., Vorobjov, M.V., Rachinskiy, A.U. (2023) CFD-modeluvannya procesiv teploobminu i gidrodinamiki zasobami programnogo kompleksu: monografiya [CFD modelling of heat transfer and hydrodynamic processes by means of a software package: a monograph]. *KPI im. Igorya Sikorskogo*, pp. 15-22.
- [4] Xiong, Q.-R., Zhu, G.-C., Zhong, M. (2016) Experimental investigation of temperature measurement on the wall of flame tube for a triple combustor. *Journal of Aerospace Power*. № 4, pp. 775-779.
- [5] Feist, J.P., Heyes, A.L. (2001) Measurement of Wall Temperatures in Gas Turbine Combustors Using Thermographic Phosphors. *ISOABE*. №15. Vol. 1.
- [6] Zhang, L., Zhang, R., Xiao, S., Liu, Y., Xiong, Y. (2021) Experimental investigation on high temperature deformation of regeneratively cooled combustor structure based on non-contact measurement. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*. Vol. 35. № 1, pp. 53-59.

- [7] Kager GmbH (2015) Temperaturindikatoren - Wir machen Wärme sichtbar. Retrieved from <https://www.kager.de/en/hochtemperaturprodukte/temperaturmess-streifen-punkte/>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Халатов, А.А., Ющенко, К.А., Ісаков, Б.В., Дашевський, Ю.Я., Шевцов, А.П. (2013) Газобудування в Україні: сучасний стан і перспективи розвитку. *Вісн. НАН України*. № 12. С. 40-48.
- [2] Варламов, Г.Б., Позняков, П.О., Юрашев, Д.М. (2012) Комплексні дослідження енергоекологічних показників експлуатації ГТУ у складі газоперекачувального агрегату типу ГТК-10. *Енергосбережение*. № 01(95). С. 15-24.
- [3] Баранюк, О.В., Воробйов, М.В., Рачинський, А.Ю. (2023) CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки засобами програмного комплексу: монографія. *КПІ ім. Ігоря Сікорського*. С. 15-22.
- [4] Xiong, Q.-R., Zhu, G.-C., Zhong, M. (2016) Experimental investigation of temperature measurement on the wall of flame tube for a triple combustor. *Journal of Aerospace Power*. № 4, pp. 775-779.
- [5] Feist, J.P., Heyes, A.L. (2001) Measurement of Wall Temperatures in Gas Turbine Combustors Using Thermographic Phosphors. *ISOABE*. №15. Vol. 1.
- [6] Zhang, L., Zhang, R., Xiao, S., Liu, Y., Xiong, Y. (2021) Experimental investigation on high temperature deformation of regeneratively cooled combustor structure based on non-contact measurement. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*. Vol. 35. № 1, pp. 53-59.
- [7] Kager GmbH (2015) Temperaturindikatoren – Wir machen Wärme sichtbar. Retrieved from <https://www.kager.de/en/hochtemperaturprodukte/temperaturmess-streifen-punkte/>.

© Савушкін В.В.

Дата надходження статті до редакції: 17.10.2023

Дата затвердження статті до друку: 06.11.2023