

УДК 621.438

к.т.н., доц. **Павло Пасічник**,

pasichnyk.po@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8499-6949,

к.т.н., доц. **Олександр Погосов**,

pohosov.oh@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2158-8897

к.т.н., доц. **Олександр Кравчук**,

kravchuk.oa2@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6578-8896,

ст. викл. **Лариса Пашкова**,

pashkova.lv@knuba.edu.ua ORCID: 0009-0001-2056-6090,

к.т.н., доцент **Володимир Новіков**,

novikov.vd@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0009-6592-0805,

к.т.н., доцент **Михайло Кириченко**,

kyrychenko.ma@knuba.edu.ua ORCID: 0000-0002-3651-3153

Київський національний університет будівництва і архітектури

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.94-103>

ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

Анотація. У статті обґрунтовано необхідність переходу від регламентного обслуговування до ремонтів за реальним технічним станом газоперекачувальних агрегатів (ГПА) магістральних компресорних станцій України. Розглянуто фізичні основи теплового стану обладнання, що базуються на законах термодинаміки та ідеального газу, зокрема неминуче зростання температури при підвищенні тиску. Особливу увагу приділено вузлам, найбільш вразливим до перегрівання: опорним підшипникам, ущільненням вала та клапанним механізмам. Рекомендовано метод тепловізійної діагностики як ефективний інструмент неруйнівного контролю, що базується на законі Стефана-Больцмана та дозволяє виявляти приховані дефекти без зупинення агрегатів. У роботі представлено уніфікований алгоритм прийняття рішень, який на основі порівняння виміряної температури із граничними значеннями дозволяє класифікувати стан обладнання як нормальний, попереджувальний або критичний. Упровадження запропонованого підходу ("Tolerance Loop") сприяє підвищенню енергетичної безпеки та зниженню витрат на експлуатацію ГТС.

Ключові слова: технічна діагностика, нафтогазове обладнання, теплотехнічні вимірювання, тепловізійне знімання.

Вступ. Надійність роботи магістральних компресорних станцій (КС) є критичним фактором для енергетичної безпеки країни [1]. Газовий компресор – це критичний елемент газотранспортної системи (ГТС), що працює під екстремальним тиском та високими механічними навантаженнями. За таких умов вчасна діагностика стає базовою вимогою безпеки.

Будь-яка несправність на магістральній КС може призвести до катастрофічних наслідків. Так, вихід з ладу клапанів або поршневої групи може спровокувати розгерметизування системи, що в умовах перекачування природного газу неминуче веде до вибухів та масштабних пожеж. Аварійні викиди великих об'ємів метану в атмосферу завдають нищівного удару по довкіллю. Раптове зупинення транзиту газу тягне за собою багатомільйонні штрафи, пошкодження суміжної інфраструктури та дефіцит енергоресурсів для промислових і побутових споживачів.

Сучасні методи планування ремонтного обслуговування газоперекачувального обладнання компресорних станцій дозволяють урахувати реальний стан газоперекачувальних агрегатів (ГПА) безпосередньо у передремонтний період [2]. Це досягається за допомогою комплексних вимірювань теплового стану та вібрації обладнання. Аналіз отриманих результатів дозволяє приймати остаточне рішення щодо виведення в ремонт ГПА. В умовах сьогодення організація ремонтних робіт базується на встановлених нормативами інтервалах міжремонтної експлуатації для кожного об'єкта. У зв'язку з великим ступенем зношення парку газоперекачувального обладнання української ГТС та високими витратами на ремонтне обслуговування, виникає необхідність зменшення похибок у плануванні дат ремонтів та підвищення якості самих відновлювальних робіт. Досягти цього можна шляхом орієнтації на реальний технічний стан обладнання, що дозволить зменшити споживання природного газу в період після ремонту завдяки покращенню загального технічного рівня та запобіганню аварійним зупиненням шляхом своєчасного виведення ГПА в ремонт з урахуванням актуального стану.

Тепловізійна діагностика є одним із найбільш ефективних неруйнівних методів обстеження теплового стану газових компресорів, оскільки вона дозволяє проводити моніторинг обладнання безпосередньо в робочих режимах без необхідності його зупинення чи демонування. Головною перевагою методу є можливість виявлення прихованих дефектів, як-от перегрівання підшипників, нещільність клапанів або порушення теплоізоляції, на ранніх стадіях, коли вони ще не фіксуються при контролюванні робочих параметрів устаткування [3].

Однак, попри високу точність та інформативність, на сьогодні існує проблема дефіциту чітких та уніфікованих регламентних документів, які б детально описували процедури тепловізійного дослідження саме для об'єктів

газотранспортних мереж. Відсутність вузькоспеціалізованих нормативів і конкретних температурних критеріїв оцінювання для різних типів газоперекачувальних агрегатів часто змушує фахівців спиратися на загальні енергетичні стандарти або суб'єктивний досвід експерта, що ускладнює процес офіційного звітування та прийняття управлінських рішень щодо термінових ремонтів [4,5].

Актуальність дослідження. Сучасний стан газотранспортної системи України вимагає перегляду традиційних підходів до технічного обслуговування. На сьогодні більшість ГПА працюють в умовах значного фізичного зносу, що робить питання їхньої надійності критичним для енергетичної безпеки країни.

Останні дослідження та публікації. Ефективне функціонування магістральних газопроводів неможливе без компресорного обладнання, яке класифікується за принципом дії на дві основні групи: об'ємні та динамічні. Об'ємні машини, до яких належать поршневі та гвинтові компресори, працюють шляхом фізичного зменшення замкненого об'єму газу. Динамічні компресори, зокрема відцентрові та осьові, використовують принцип перетворення кінетичної енергії потоку в потенціальну енергію тиску, що описується рівнянням Бернуллі. Фундаментальна функція будь-якого компресора полягає у перетворенні механічної енергії приводу в потенціальну енергію стисненого газу. Цей процес нерозривно пов'язаний із законами ідеального газу. Зокрема, закон Бойля-Маріотта визначає зворотну залежність між тиском і об'ємом [6].

$$p_1V_1 = p_2V_2, \quad (1)$$

Одночасно із цим, згідно із законом Гей-Люссака, у термодинамічній системі відношення тиску до температури залишається сталим при незмінному об'ємі. Це означає, що будь-яке технологічне підвищення тиску газу в компресорі неминуче супроводжується зростанням його температури. Розуміння цих фізичних залежностей є критичним для розрахунку потужності обладнання та характеристики теплового стану ГПА.

У процесі експлуатації компресорних установок виникають зони локального перегрівання (рис. 1), зумовлені як особливостями термодинамічного процесу стиснення, так і механічними чинниками. Найбільш вразливими елементами є опорні підшипники, де спостерігається максимальне значення сили тертя. Постійне термічне навантаження цих вузлів призводить до деградування мастильних матеріалів, що, у свою чергу, провокує ще більше зростання температури та передчасний знос деталей.

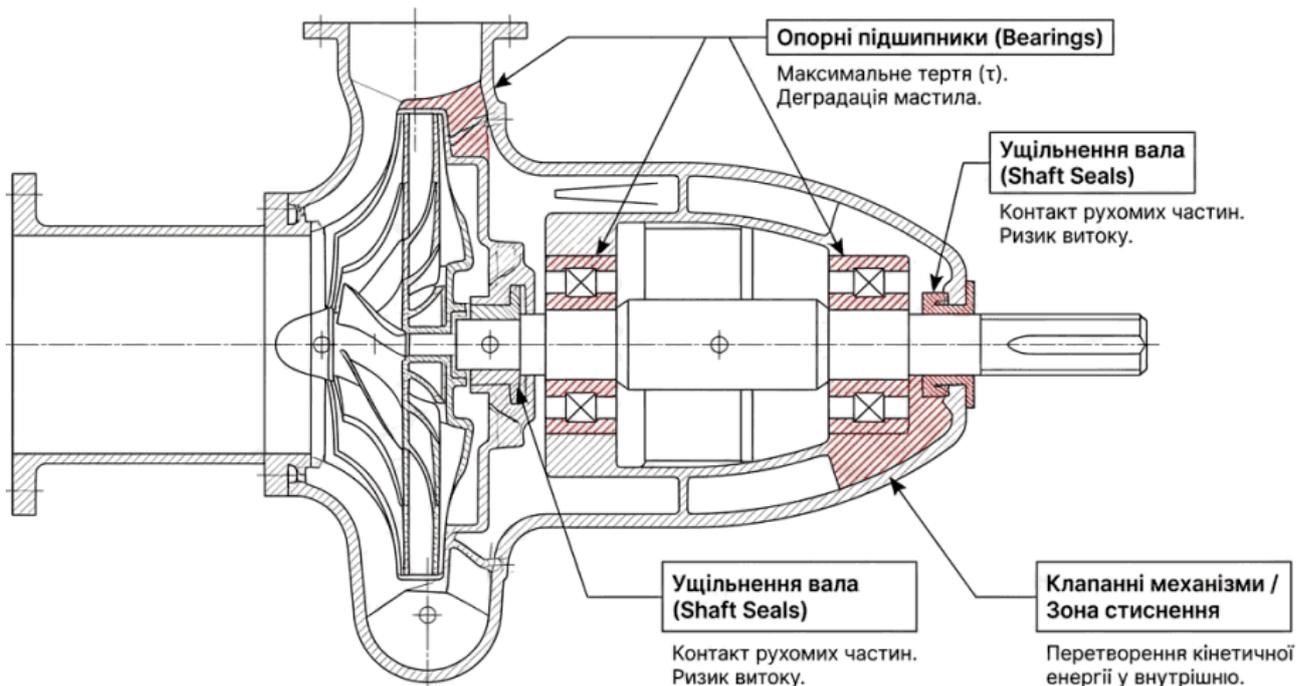


Рис. 1. Вузли компресорів, що найбільше страждають від перегрівання

Іншою критичною зоною є ущільнення вала. Через постійний контакт рухомих частин у цих вузлах виникає ризик витікання газу, що не лише знижує ефективність машини, але й створює небезпеку для персоналу та навколишнього середовища. Окрему увагу слід приділяти клапанним механізмам та безпосередній зоні стиснення. Саме тут відбувається інтенсивне перетворення кінетичної енергії у внутрішню енергію газу, що супроводжується значним виділенням теплоти. Хоча складні машини проєктуються з метою оптимізації механічної переваги, тертя залишається головним фактором, який обмежує продуктивність і надійність всієї системи [7, 8].

Перегрівання деталей компресора призводить до незворотних змін у структурі матеріалів та загального зниження ефективності роботи установки. Одним із найбільш небезпечних наслідків є зміна геометричних розмірів через термічне розширення. У прецизійних механізмах це призводить до зникнення робочих зазорів, виникнення "задирів" на поверхнях тертя та подальшого руйнування вузлів. Окрім геометричних змін, спостерігається втома металу: структура матеріалу змінюється, знижується його твердість і здатність витримувати динамічні навантаження.

Процес деформування матеріалу під навантаженням можна описати через діаграму напруження-деформації (рис. 2). У межах пружної області (Elastic Region) метал повертається до початкового стану після зняття навантаження. Проте в момент досягнення межі текучості (Yield Point) починається пластична деформація, яка завершується в точці руйнування (Failure Point).

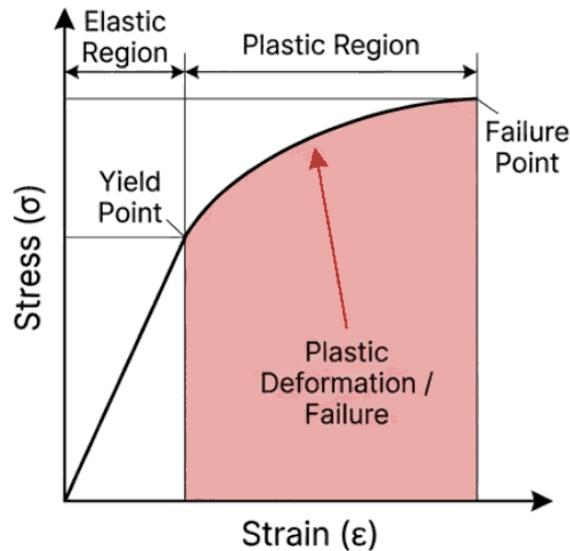


Рис.2. Діаграма напруження-деформації

Термічне навантаження значно прискорює перехід до пластичної області. У підсумку це призводить до втрати коефіцієнта корисної дії (ККД), оскільки значна частина вхідної енергії витрачається не на стиснення газу, а на подолання паразитного тертя та компенсування втрат [9, 10]. Ефективність системи при цьому розраховується як відношення вихідної потужності до вхідної:

$$\eta = (P_{out} / P_{in}) \cdot 100\%, \quad (2)$$

Формулювання цілей статті. Метою роботи є обґрунтування фізичних принципів тепловізійного методу неруйнівного контролю та впровадження чіткого алгоритму прийняття рішень для переходу від вимірювання температури до конкретних регламентних дій (моніторингу, планового ремонту або аварійного зупинення).

Основна частина. Для виявлення дефектів на ранніх стадіях без зупинення виробничого процесу застосовується тепловізійне дослідження (рис. 3). Цей метод неруйнівного контролю базується на реєструванні інфрачервоного випромінювання, що виходить від поверхонь обладнання. Основним інструментом є тепловізор, який за допомогою сенсорної матриці та електронного блоку оброблення перетворює невидиме ІЧ-випромінювання у візуальну температурну карту [11].

Фізичною основою дистанційного вимірювання температури є закон Стефана-Больцмана. За ним сумарна потужність випромінювання поверхні прямо пропорційна її температурі в четвертому степені.

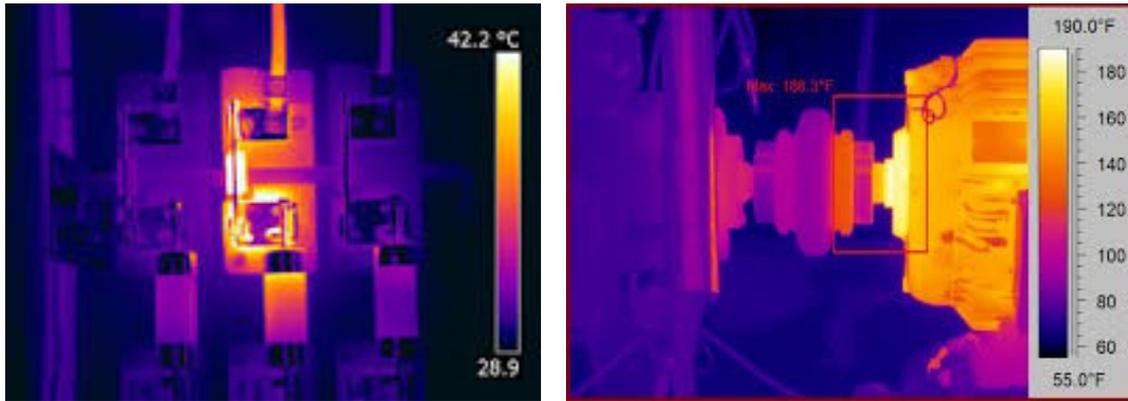


Рис.3.Термограми елементів газоперекачувальних агрегатів

Розрахункова формула, що враховує постійну Стефана-Больцмана (σ), площу поверхні (A), коефіцієнт випромінювання матеріалу (e), а також різницю температур об'єкта та навколишнього середовища, має вигляд

$$Q = \sigma \cdot A \cdot e \cdot (T^4 - T_c^4), \quad (3)$$

Завдяки цьому методу можна точно діагностувати стан підшипників, ущільнень і корпусів та виявити зони аномального нагрівання на безпечній відстані [12].

Систематична діагностика компресорного обладнання має проводитися згідно з графіком планово-попереджувальних ремонтів, що базуються на точковому діагностуванні конкретних агрегатів. Ключовим елементом цього процесу є чіткий алгоритм прийняття рішень, що базується на порівнянні виміряної температури (T_{meas}) із встановленим лімітом (T_{limit}). Якщо поточне значення менше ліміту ($T_{meas} < T_{limit}$), обладнання працює в штатному режимі під постійним моніторингом.

У випадку, коли виміряна температура наближається до граничного значення ($T_{meas} \approx T_{limit}$), системі присвоюється статус "Попередження" (Warning), що передбачає підготовлення до планового ремонту. Ситуація, за якої температура перевищує допустиму норму ($T_{meas} > T_{limit}$), вважається критичною і потребує негайного аварійного зупинчення обладнання для запобігання катастрофічним руйнуванням. Для точного визначення нормативних значень використовується рівняння допусків: номінальне значення мінус сума встановлених відхилень. Такий підхід дозволяє створити замкнений цикл (рис. 4) контролю ("Tolerance Loop"), що забезпечує максимальну надійність і безпеку експлуатації газотранспортної інфраструктури.

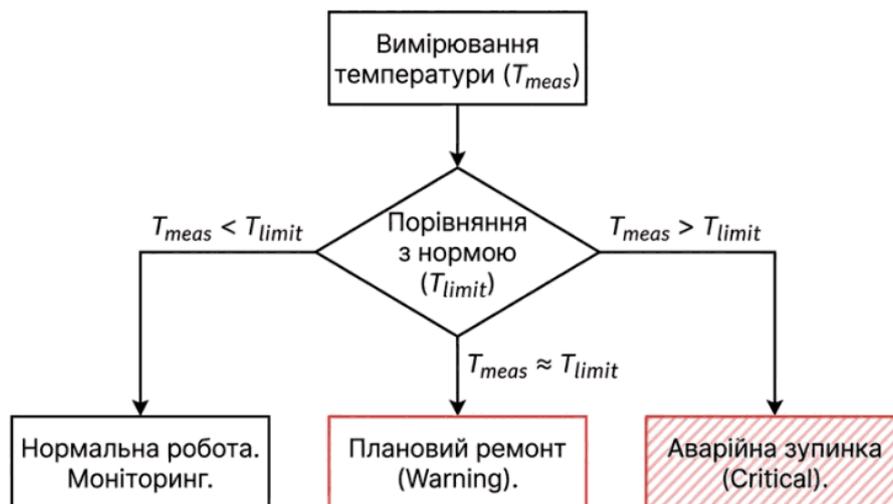


Рис.4. Алгоритм прийняття рішень на основі тепловізійного знімання

Висновки. Вчасна діагностика газоперекачувальних агрегатів є критичною для енергетичної безпеки, оскільки запобігає катастрофічним аваріям, вибухам та економічним збиткам, зумовленим фізичним зносом обладнання. Оскільки процеси стиснення та механічне тертя неминуче генерують теплоту, що призводить до деградації матеріалів і втрати ККД, тепловізійний контроль стає незамінним інструментом неруйнівного обстеження без зупинення агрегатів. Використання дистанційної термографії на основі закону Стефана-Больцмана дозволяє ідентифікувати приховані дефекти підшипників та ущільнень на ранніх стадіях. Перехід до обслуговування за реальним станом замість жорстких часових інтервалів дозволяє мінімізувати похибки в плануванні ремонтів та підвищити надійність ГТС. Упровадження уніфікованого алгоритму порівняння вимірених температур із граничними допусками забезпечує чітке обґрунтування для моніторингу, планового ремонту або аварійного зупинення обладнання.

Перспективи подальших досліджень. Перспектива полягає у розробленні та впровадженні уніфікованих галузевих регламентів, які б містили конкретні температурні критерії оцінювання для різних типів газоперекачувальних агрегатів. Важливим напрямком є інтеграція тепловізійного методу з комплексними вібродіагностичними вимірюваннями для створення максимально точної карти реального технічного стану обладнання. Подальша автоматизація моніторингу та вдосконалення алгоритмів «циклу допусків» дозволять мінімізувати вплив суб'єктивного людського фактора, що забезпечить перехід до предиктивного обслуговування задля значного підвищення енергоефективності та надійності експлуатації газотранспортної системи

References

1. Stepiuk M. D., Horal L. T. "Prohnozuvannia nadiinosti HPA – osnova bezperebiinoho hazopostachannia". *Naftohazova enerhetyka*, №4(9), 2008. pp.27–31. Available at: <https://nge.nung.edu.ua/index.php/ngc/article/view/199>
2. MacAvoy P.W. "The natural gas market: Sixty years of regulation and deregulation". Yale University Press, 2008.
3. Shcherbakov, O., Tkachenko D., Parafiinyk V., Hurinenko V., Kostiuk V., Skrypka O., Kyrylash O. "Experimental Research on the Thermal State of a Shell for Noise and Heat Insulation of the Gte9012 Gas Turbine Engine Used for the Mechanical Drive of the Gcu-c-16s Turbo-Compressor Package." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 7(78), Dec. 2015, p. 35., <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56244>.
4. Hrudz V. Ya., Hrudz Ya. V., Dvolitka M. Ya. "Otsiniuvannia nadiinosti hazoperekachuvalnykh ahrehativ za dynamikoii zminy parametra stanu." *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. Vol. 16, no. 3, 2016, pp. 49-54. Available at: <https://pdogf.com.ua/uk/journals/3-60>
5. Grudz V., Dvolitka M. "Research of repair works expenses dynamics for gas pumping aggregates." *International Scientific Journal "Internauka,"* no. 6, Mar. 2018, <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2018-6-3613>.
6. Chong M. "Prediction of Heat and mass transfer during compression in reciprocating compressors". *Proceedings on the 1976 Purdue compressor Technology Conference*. West Lafayette, Purdue University, 1976. pp. 466–472.
7. Mill L. D. "Temperature reveals compressor ills". *Oil and Gas Journal*, Vol. 69, no. 33, 1971, pp. 73–77.
8. Sridhar, N., D. S. Dunn, A. M. Anderko, M. M. Lencka, H. U. Schutt. "Effects of Water and Gas Compositions on the Internal Corrosion of Gas Pipelines—Modeling and Experimental Studies." *Corrosion*, vol. 57, no. 3, Mar. 2001, pp. 221–35. <https://doi.org/10.5006/1.3290347>.
9. Romashko-Maistruk, O. V., Romashko V. M. "Main features of concrete deformation under the action of dynamic loads." *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, no. 205, Sept. 2023, pp. 60–70. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288924>.
10. Lazariyev, Dmytro, Yurii Avramenko, Oleksandr Zyma, Pavlo Pasichnyk. "Experimental Researches of Concrete Ultimate Characteristics and Strength of Compressed and Bended Reinforced Concrete Elements." *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations*, edited by Volodymyr Onyshchenko, Gulchohra Mammadova, Svitlana Sivitska, Akif Gasimov, vol. 73, Springer International Publishing, 2020, pp. 133–41. *Lecture Notes in Civil Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3_15.

11. Monitorynh i diahnostryka stanu mashyn. Termohrafiia. Chastyna 1. Zahalni protsedury. DSTU ISO 18434-1:2015, DP «UkrNDNTs», 2015.
12. Duffie J.A., Bachman W.A. "Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind." 5th edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2020. Available at: <https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/SolarPowerForAfrica/Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Photovoltaics%20and%20Wind.pdf>

UDC 621.438

PhD, Assoc. Prof. **Pavlo Pasichnyk**,

pasichnyk.po@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8499-6949,

PhD, Assoc. Prof. **Oleksandr Pohosov**,

pohosov.oh@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2158-8897

PhD, Assoc. Prof. **Oleksandr Kravchuk**,

kravchuk.oa2@knuba.edu.ua, [ORCID: 0000-0001-6578-8896](https://orcid.org/0000-0001-6578-8896),

Senior Lecturer **Larysa Pashkova**,

pashkova.lv@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0001-2056-6090,

PhD, Assoc. Prof. **Volodymyr Novikov**,

novikov.vd@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0009-6592-0805,

PhD, Assoc. Prof. **Mykhailo Kyrychenko**,

kyrychenko.ma@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3651-3153

Kyiv National University of Construction and Architecture

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.94-103>

DECISION-MAKING BASED ON THERMAL IMAGING DIAGNOSTICS OF GAS PUMPING UNITS

Abstract. *The article substantiates the necessity of transitioning from scheduled maintenance to condition-based maintenance of gas pumping units (GPU) at Ukraine's main compressor stations. It examines the physical foundations of the equipment's thermal state based on the laws of thermodynamics and ideal gases, specifically the inevitable temperature rise during pressure increases. Particular attention is paid to components most susceptible to overheating: bearings, shaft seals, and valve mechanisms. The author details the thermal imaging diagnostics method as an effective non-destructive testing tool based on the Stefan-Boltzmann law, allowing for the detection of hidden defects without stopping the units. The paper presents a unified decision-making algorithm that, by comparing the measured temperature with limit values, classifies the equipment's condition as normal,*

warning, or critical. Timely diagnostics of gas pumping units is critical for energy security, as it prevents catastrophic accidents, explosions and economic losses caused by physical wear of equipment. Since compression processes and mechanical friction inevitably generate heat, which leads to material degradation and loss of efficiency, thermal imaging becomes an indispensable tool for non-destructive inspection without stopping the units. The use of remote thermography based on the Stefan-Boltzmann law allows you to identify hidden defects in bearings and seals at an early stage. The transition to maintenance based on real conditions instead of rigid time intervals allows you to minimize errors in repair planning and increase the reliability of the gas transmission system. The implementation of a unified algorithm for comparing measured temperatures with limit tolerances provides a clear justification for monitoring, scheduled repairs or emergency shutdown of equipment.

Keywords: *technical diagnostics, oil and gas equipment, thermal measurements, thermal imaging.*

Received/Надійшла до редакції 21.11.2025
Reviewed/Рецензована 18.12.2025
Accepted/Прийнята 24.12.2025