

ДОСВІД НТЦ «ТЕРМОКОНТРОЛЬ» В ОБЛАСТІ ТЕПЛОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

В.О. Стороженко, С.М. Мешков, Р.П. Орел, О.В. Мягкий

НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки. 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.
E-mail: volodymyr.storozhenko@nure.ua

Представлені основні результати досліджень і розробок в області створення технологій теплового методу контролю, виконаних у НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки з 1973 р. до теперішнього часу. Показані результати застосування теплових технологій для діагностування затирання підшипників і порушень електроізоляції в заглибних електродвигунах серії ПЕД, які застосовують для нафтовидобутку. Показані результати контролю стану металу трубопроводів агрегатних залів АЕС. З'ясувалося, що дефекти викликані кавітаційною ерозією, мають «тепловий слід» і можуть бути зареєстровані тепловим методом. Описано технологію діагностування підземних трубопроводів і витікань у них. Розроблено метод статистичної обробки результатів теплового діагностування газоперекачувальних агрегатів магістральних газопроводів, який включає створення віртуального еталонного зразка вузла агрегату; сформовані інформативні ознаки для порівняння температурних полів; сформовано вирішальне правило, яке вказує на відхилення обраних інформативних ознак від еталонного значення. Експериментально підтверджено результати розрахунку рівня рідкої фази у газопроводах. Наведено результати термографічного обстеження гідротехнічних споруд Дніпровської ГЕС. Наведено кількісні показники теплових втрат будівель, визначені під час тепловізійного обстеження. Розглянуто напрями та перспективи розвитку теплового методу. Бібліогр. 20, рис. 9.

Ключові слова: тепловий неруйнівний контроль, теплове діагностування, заглибні електродвигуни, підземні трубопроводи, кавітаційна ерозія, гідроспоруди, теплові втрати

На сьогоднішній день тепловий метод неруйнівного контролю є одним із найбільш ефективних та широко використовуваних засобів діагностування промислових об'єктів, виробів та матеріалів. Унікальність методу полягає в його універсальності, високій продуктивності та безпечній реалізації. Теплообмін, або теплоперенесення – мимовільний необоротний процес поширення теплоти, обумовлений різницею температур. Процес теплопередачі відбувається в просторі та в часі, тому її аналітичні дослідження в тепловому методі зводяться до вивчення просторово-часової зміни температури. В межах теплового методу виділяють теплову дефектоскопію, дефектометрію і томографію. Теплова томографія найповніше визначає параметри дефектів і полягає у повній розшифровці структури об'єкта. Водночас часто важливо визначити не тільки параметри дефекту, але й узагальнені параметри технічної системи, що характеризують її працездатність. Це завдання вирішує технічна діагностика. Треба зауважити, що чітких меж між дефектоскопією, дефектометрією, томографією й технічним діагностуванням не існує і часто вони вирішують подібні завдання. У світовій технічній літературі всі види теплового методу об'єднують під назвою «кількісна термографія» (Quantitative Thermography), або «інфрачервона термографія» (IR Thermography). Якщо в технічній діагностиці переваги ІЧ-термографії є безперечними, то активний метод неруйнівного

контролю (НК) відчував періоди підйому та спаду. Основною особливістю теплового методу є те, що для кожного об'єкта контролю необхідно створювати окрему технологію, що включає спосіб нагріву, реєстрацію та обробку отриманих результатів. Нині тепловий неруйнівний контроль (ТНК) – це високотехнологічна сферу теоретичних і прикладних досліджень, які об'єднують досягнення в області теплопередачі, ІЧ-технології, матеріалознавства та комп'ютерної інженерії [1].

Термографія і ТНК нині актуальні, вони застосовуються на низці підприємств і організацій України та мають величезні перспективи використання в майбутньому. У розвитку цього напрямку в Україні значне місце посідає внесок колективу НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ) (рис. 1).

Стисла історія. Поява в ХНУРЕ наукового напрямку «Тепловий неруйнівний контроль» була обумовлена бурхливим розвитком ракетно-космічної техніки. На початку 70-х років ХХ ст. виявилось, що розробка нових матеріалів і виробів із них в авіаційно-космічній техніці випереджає розвиток засобів їхнього контролю. У світових лідерів у цій області з'явилися перші методики ТНК і відповідне обладнання для його реалізації. Оскільки поява теплового методу була пов'язана з оборонними проектами, в умовах гострого протистояння між світовими державами доступна інформація щодо теплових

Стороженко В.О. – <https://orcid.org/0000-0002-7609-2955>, Мешков С.М. – <https://orcid.org/0000-0003-3464-8318>, Орел Р.П. – <https://orcid.org/0000-0002-3592-2393>, Мягкий О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0442-5570>
© В.О. Стороженко, С.М. Мешков, Р.П. Орел, О.В. Мягкий, 2021



Рис. 1. НТЦ «Термоконтроль» (2013 р.) Бандурян О.В., Стороженко В.О., Протасеня С.Ю., Орел Р.П., Мягкий О.В., Мешков С.М., Котляр Т.Ю., Ткачев В.М., Малик С.Б., Плетенецький М.В.

технологій була вкрай обмеженою. Тепловий метод в СРСР у той час не мав власної теоретичної бази і необхідних технічних засобів. Тому для розвитку перспективного методу необхідно було проводити роботи відразу по декількох напрямках:

- створювати теоретичну основу;
- створювати прилади для реєстрації теплових полів;

- створювати методи обробки інформації.

Історію розвитку теплового методу в Україні та участь у ній НТЦ «Термоконтроль» можна простежити за тематикою проведених досліджень і проектів. Першою роботою колективу була участь у проекті «Розроблення методів дефектоскопії склопластикових виробів засобами ІЧ-техніки» (1973 р.). Завдання додатково ускладнювалось великою площею та складною геометрією об'єктів контролю. Було створено комплекс для теплової дефектоскопії та промислову методику для виробів плоскої й циліндричної форм із скло- та вуглепластикових матеріалів [2, 3]. Теплові скануючі дефектоскопи ІКД-1, які входили до складу комплексу, були першими в Україні (рис. 2, а, б). Вже перші теплові дефектоскопи мали такі відмінності від традиційних дистанційних вимірювачів температури, як наявність системи сканування, системи вирівнювання чутливості уздовж рядків сканування, системи пригнічення варіювання коефіцієнта випромінювання тощо.

Це було початком багаторічних досліджень нових матеріалів, результатом яких було створення низки оригінальних засобів і технологій ТНК. Для створення елементів потужних лазерних систем потрібні були неконтактні засоби. У 1979 р. у рамках теми «Розроблення макету установки для візуалізації теплових полів» був створений і пройшов випробування ІЧ-сканер П-10П [4] (рис. 2, в). Прилад призначався для контролювання розподілу температури на поверхні вихідного вікна лазера великої потужності.

У 1980 р. для СКБ «ПЕД-потенціал» (м. Харків) у межах теми «Розроблення пристроїв для безконтактної теплової діагностики заглиблених електродвигунів» були сконструйовані пірметри П-21П [5] (рис. 2, з). Випробування були проведені на ремонтних підприємствах нафтовидобувного комплексу у Татарії, де прилад отримав позитивні відгуки нафтовиків. Була випущена партія з 15 приладів. У 1986 р. пірметр П-21П демонструвався на ВДНГ України, де отримав диплом і нагороджений медаллю.

У 1983 р. лабораторією отримані 3 промислових тепловізори ТБ-03, за допомогою яких було проведено дослідження виробів із вакуумно-порошковою теплоізоляцією. Отримані результати дали змогу подовжити розвиток перспективного напрямку у проекті «Розроблення автоматизованого теплового неруйнівного контролю побутових термосів». Було розроблено теплової дефектоскоп ТД-10К для інтегрального оцінювання теплоізолюючих властивостей термосів «ТЕМЕТ». Для поточного контролю було створено промислову автоматизовану систему АСКБТ, яку (2 установки) впроваджено на підприємстві ХЗТО (м. Харків). Для НТЦ отримано цінний досвід створення промислових автоматизованих систем теплового контролю.

У 1985–1988 рр. колектив лабораторії у межах проекту «Дослідження принципів побудови і створення радіометрів спеціального призначення» брав участь у програмі «Буран». Метою робіт було створення приладів для теплової дефектоскопії нових композитних матеріалів і теплообмінних апаратів дюзових камер. Були розроблені унікальні теплові дефектоскопи [6, 7]:

- реєструюча частина робототехнічного комплексу;
- малогабаритний радіометр П-30А (3 зразка) для роботи всередині об'єкта контролю (рис. 2, д);
- радіометр П-40А (2 зразка) з охолоджуванням приймачем для контролю жароміцних керамічних покриттів (рис. 2, е).

На початку 90-х р. ХХ ст. через відсутність фінансування багато цікавих напрямів ТНК розроблялись в ініціативному порядку. Фахівці НТЦ і студенти проводили роботи, в результаті яких було створено ескізний проект автоматизованої системи теплової діагностики колісних букс рухомих вагонів для залізниці. Тоді проект не був реалізований, але у 1994 р. напрацювання були використані у темі «Створення тепловізійних засобів для транспортних машин» (КАДІ). В результаті за стислий час була розроблена і виготовлена партія (3 зразка) приладів РАД-1 [9] (рис. 2, ж).

Високий рівень проведених лабораторією ТНК досліджень і розробок підтверджується участю в багатьох Міжнародних конференціях і проектах. Міжнародний проект спільно з Францією, Фінлян-

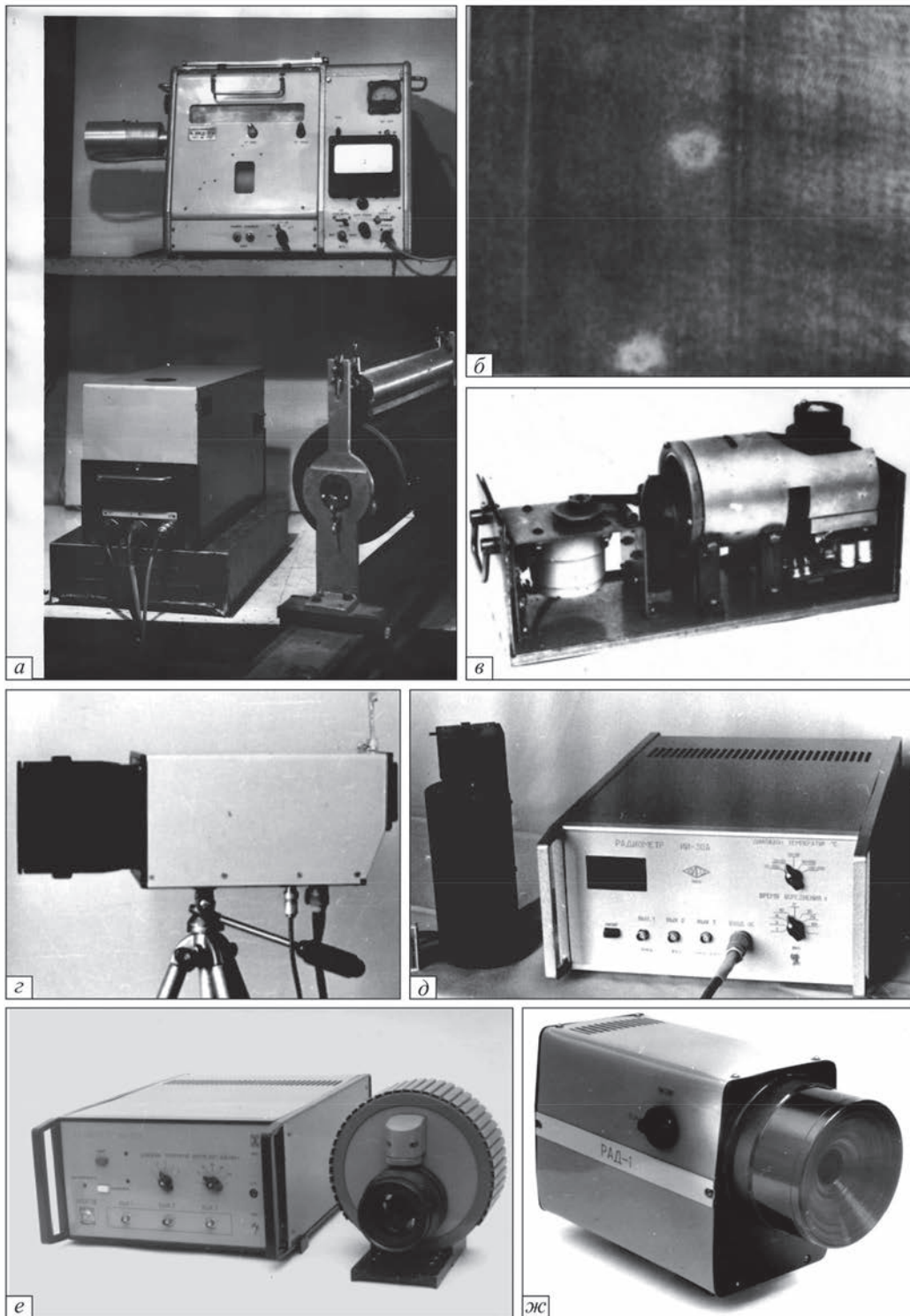


Рис. 2. Прилади, розроблені в НТЦ «Термоконтроль»: ІКД-1 (а); термограма, що отримана ІКД-1 (б); сканер П-10П для дослідження лазерної техніки (в); радіометр П-21П для діагностування двигунів серії ПЕД (з); дефектоскоп П-30А (д); дефектоскоп П-40А (е); радіометр РАД-1 для діагностування електрообладнання (ж)

дією і Росією INTAS № 1770 «Візуалізація та аналіз механічної напруги в будівельних конструкціях методом інфрачервоної термографії» («Visualisation and analysis of mechanical stresses in building constructions by using infrared thermography») у 1998 р. отримав вищу оцінку (А1) журі. Участь лабораторії у вітчизняних проектах відображено у:

– національній програмі 04.03 «Підвищення надійності і довговічності машин і конструкцій» (1997–2000 рр.);

– темі № 2/1517 «Теоретичні та прикладні основи теплової дефектометрії і томографії», Київ, Міністерство освіти і науки України.

У 1997 р. лабораторія ТНК отримала ліцензію Космічної Агенції України на проведення робіт

у області ракетно-космічної техніки. Співпраця з КБ «ПВДЕННЕ» (м. Дніпропетровськ) почалася з робіт по темі «Випробування теплового неруйнівного методу контролю якості для силових конструкцій сонячних батарей КА».

У 2002 р. було укладено договір «Розробка, виготовлення, випробування і передання науково-технічної продукції по стендах для контролю лопаток і теплозахисних покриттів». Світові тенденції в тепловому контролі вказували на те, що підвищення потенціалу методу безпосередньо пов'язане з використанням сучасних методів обробки температурної інформації. Цей проект вивів дослідження НТЦ на новий рівень. Натурні експерименти стали проводитись за допомогою промислового тепловізора, що дало змогу реєструвати динаміку процесу розвитку температурних полів, що значно підвищило інформативність контролю.

Наприкінці 90-х років ХХ ст. зміна ситуації в країні, соціальні зрушення в суспільстві, встановлення нових відносин, розрив науково-технічних зв'язків – все це вимагало нових підходів і організаційних рішень для продовження науково-дослідних робіт. Завдяки тому, що до штату фахівців лабораторії переважно входили викладачі кафедри фізики, вдалося зберегти науково-технічний потенціал і матеріальну базу. У 1998 р. лабораторію «Теплового неруйнівного контролю» було перетворено в НТЦ «Термоконтроль». Це дало позитивні результати.

У 2009–2010 рр. виконувалася держбюджетна науково-дослідна тема «Технології застосування термографічних приладів для аналізу теплових полів», в якій були відображені отримані на той момент досягнення НТЦ. Після модернізації лабораторного тепловізора для роботи в польових умовах і на відкритих просторах у 2004–2013 рр. термографісти НТЦ брали участь у тепловізійних обстеженнях низки важливих промислових об'єктів України: енергетичного обладнання ТЕС Жовті Води, Зміївської ГРЕС, Стаханівського заводу феросплавів, Запорізької АЕС, Дніпровської ГЕС, газоперекачувального обладнання ГПУ «Шебелінкагазвидобування».

За роки плідної дослідницької роботи випущено понад 200 публікацій, у тому числі 11 в іноземних виданнях, отримано 8 патентів. Захищено 9 кандидатських дисертацій і одна докторська.

Теплова діагностика (passive TNDT). Як видно з переліку реалізованих проектів, НТЦ був єдиною в Україні організацією, яка займалася в повному обсязі всіма проблемами теплового неруйнівного контролю:

- аналіз об'єкту (побудова теплофізичних моделей, рішення прямих і зворотних задач, ІЧ-дефектоскопія, дефектометрія і томографія, комп'ютерне моделювання);
- розробка й виготовлення апаратури ТНК (реєструючих пристроїв, систем теплового збудження, систем обробки інформації);

– проведення лабораторних (натурних) випробувань і відпрацювання технологій ТНК для різних об'єктів.

Принцип теплової діагностики полягає у порівнянні аналізованого і еталонного полів температур. Аномалії температури є індикаторами дефектів, а їх характеристики і зміна у часі лежать в основі кількісних оцінок тих чи інших параметрів об'єктів.

Прикладом ефективного застосування теплової діагностики є виявлення місць затирання підшипників у заглибних електродвигунах (ПЕД) для нафтовидобутку. Метою діагностики було виявлення місць перегріву на корпусі двигуна, які є ознаками характерних дефектів: затирання у підшипниках ротора, розташованих уздовж ПЕД, та короткого замикання на окремих ділянках обмотки. Регламентом експлуатації ПЕД передбачається періодичне підняття із свердловини і розбирання з метою доступу до підшипників. Виробничі випробування радіометра П-21П (рис. 2, з) виявили, що температура над дефектним підшипником може перевищувати середню на кілька градусів [5].

Метою робіт, проведених фахівцями НТЦ (рис. 3) на Запорізькій АЕС [9], було визначення ефективності застосування термографії для виявлення прихованих дефектів металу трубопроводів. В агрегатних залах двох блоків були обстежені дві групи об'єктів: паропроводи та трубопроводи другого контуру основного конденсату.

Термографічне обстеження проводили на ділянках трубопроводів за таких умов: без механічної підготовки поверхні об'єктів та під час нормальних режимів роботи обладнання. Обстеження регламентувалися технічними вимогами на проведення робіт «Контроль металу трубопроводів і обладнання енергоблоків методом теплової термографії» від 02.10.2007. Згідно з діючими на теплових станціях нормами паропроводи високого тиску вкриті шаром із теплоізоляції (скловати) та вміщені в захисний металевий екран, який може сильно спотворювати теплову картину (рис. 4, а). На фрагменті об'єкта з гладкою поверхнею (рис. 4, б) було виявлено ді-



Рис. 3. Учасники обстеження трубопроводів АЕС

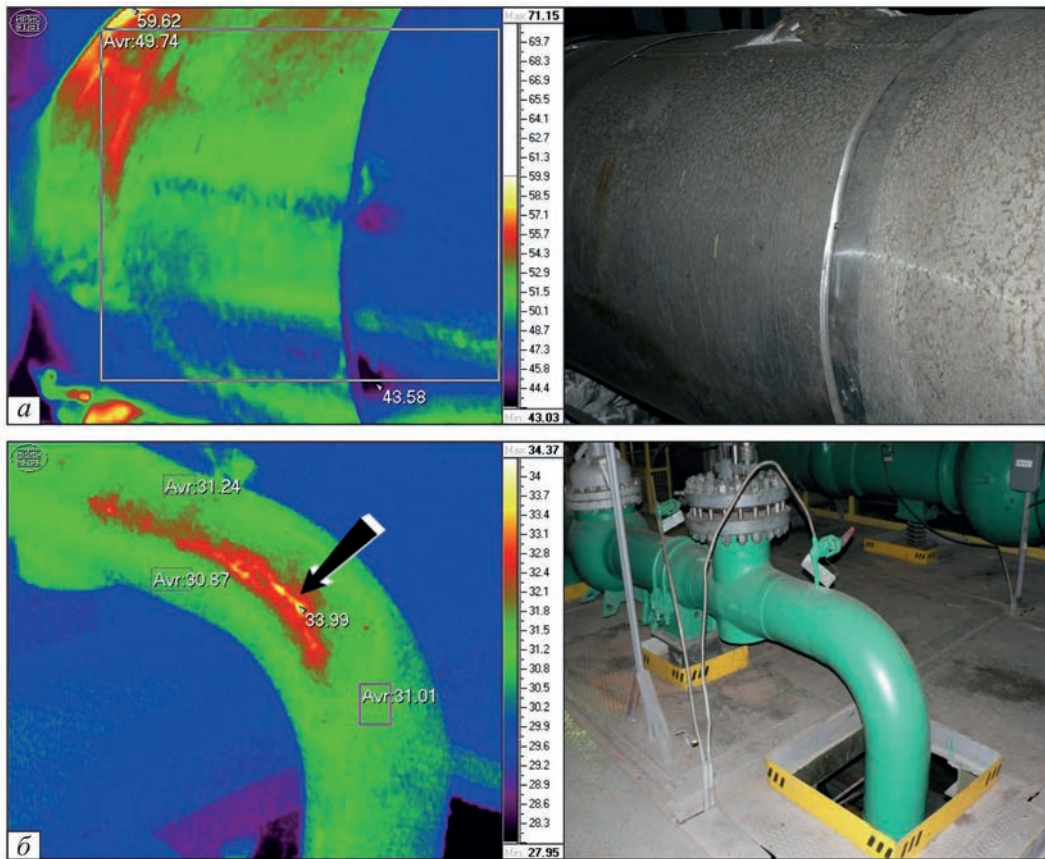


Рис. 4. Визначення стану металу на трубопроводах АЕС: ділянка паропроводу високого тиску з можливим дефектом (а); виявлена ділянка з кавітаційною ерозією (дефект потоншення стінки труби) (б)

лянку з передбачуваним дефектом. Ознакою внутрішнього дефекту, що розвивається, є температура і площа теплової аномалії.

Цікаві результати були отримані під час обстеження трубопроводів основного конденсату (температура теплоносія 40 °С) [9]. На результати тепловізійної зйомки в закритих приміщеннях, коли температура об'єкта наближена до температури навколишнього середовища (30 °С), великий вплив мають зовнішні фактори. В результаті їх дії на поверхні об'єктів формуються зони з уявною («наведеною») температурою, яка не відповідає реальній радіаційній температурі об'єкту. Крім кількісних температурних відмінностей такі наведені аномалії мають і якісні відмінні ознаки. Були виявлені й вивчені такі види факторів, що впливають на температурні поля об'єктів:

- вплив освітлення;
- вплив форми поверхні об'єкта;
- вплив потужних зовнішніх теплових випромінювачів;
- вплив теплообміну об'єкта з підлогою приміщення.

В результаті досліджень виявлено фрагмент трубопроводу з прихованим дефектом – кавітаційною каверною (рис. 4, б). Дефект виявлено за такими ознаками: форма дефектної зони не мала регуляр-

ного характеру й відрізнялася від температурних спотворень, що викликані вивченими зовнішніми факторами; розташування теплової аномалії не змінювалося у випадку зміни ракурсу зйомки; максимальна температура аномалії відрізнялася від середньої температури іншої частини труби на 2,6 °С. На підтвердження факту виявлення свідчить те, що виявлений дефект знаходився на повороті трубопроводу, де відбувається різке гальмування потоку конденсату, а такі місця є найбільш уразливими для виникнення кавітаційних каверн. Отриманий результат підтверджений даними ультразвукового контролю.

У світовій атомній енергетиці програми технічного обслуговування АЕС передбачають до 50 тис. тестових процедур, серед яких постійно збільшується частка тепловізійного моніторингу. Програми тепловізійного огляду впроваджені на всіх АЕС США, є відомості про застосування тепловізійного методу на низці російських АЕС [10]. У вітчизняній атомній енергетиці тепловізійний метод поки застосування не знайшов.

Нині актуальним є виявлення витікання з підземних трубопроводів. Стосовно трубопроводів теплової діагностика полягає в тому, що внаслідок відмінності температури транспортованої по трубопроводу речовини від температури ґрунту на поверхні ґрун-

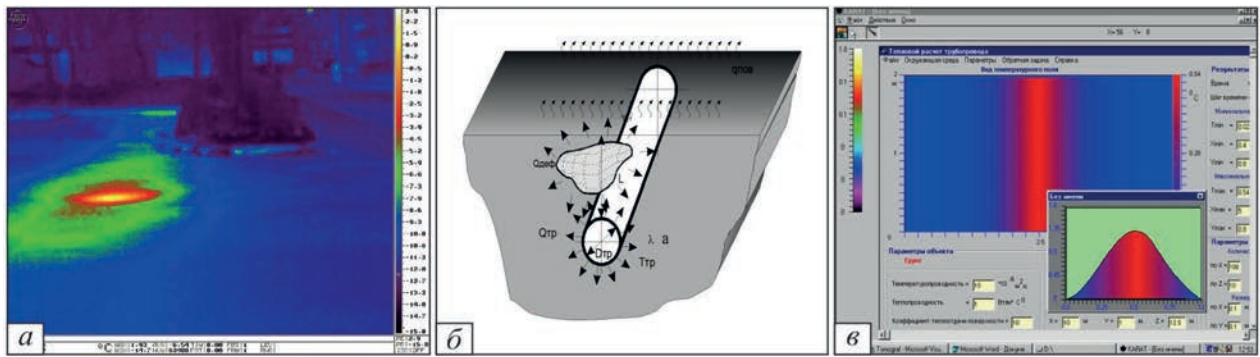


Рис. 5. Діагностування підземних трубопроводів: термограма трубопроводу з витіканням (а); теплофізична модель (б); інтерфейс програми «Трубопровід» з обробленими даними (для бездефектної ділянки) (в)

ту виникає надмірне температурне поле, яке може бути зареєстровано. Розшифрування отриманого температурного розподілу дає можливість визначити деякі параметри трубопроводу і дефектів у ньому (рис. 5, а). Тепловий метод дає змогу:

- виявляти місця залягання трубопроводів і протизаконні врізання в них;
- визначити глибину залягання трубопроводу і наявність «спливання» в ньому;
- виявляти й оцінювати розмір витікання рідких і газоподібних продуктів;
- виявляти засмічення трубопроводів і порушення теплоізоляції.

Для опису процесу витікання й отримання апріорної інформації про об’єкт створено теплофізичну модель (рис. 5, б), що зв’язує параметри трубопроводу, ґрунту, умови навколишнього середовища [11, 12] та комп’ютерну програму «Трубопровід» (рис. 5, в). Програма використовувала метод скінченних різниць у тривимірному просторі та давала змогу отримувати температурний розподіл на поверхні ґрунту. Шляхом комп’ютерного моделювання встановлено поріг чутливості пасивного ТНК за заданих на момент реєстрації теплофізичних характеристик ґрунту – витікання води 0,5 м³/год за різниці температур води та навколишнього середовища 20 °С. Тепловий метод дає можливість визначити місця залягання трубопроводу з точністю до 0,1 м по вертикалі і горизонталі. Розроблено рекомендації щодо термографування підземних трубопроводів і шлях переходу до визначення обсягу витікання за температурним полем на поверхні ґрунту. Досліджено вплив добових і сезонних коливань температури навколишнього середовища на похибку теплового діагностування трубопроводів, запропоновані методики оптимізації режимів контролю, що дало змогу зменшити похибки результатів на 10...50 %. Запропоновано метод спектрального аналізу термограм для ідентифікації температурних полів за рівнями теплових шумів, які наближені до рівня корисного сигналу.

Важливим завданням, від якого залежить ефективність роботи газотранспортної системи України,

є підвищення надійності й довговічності газоперекачувальних агрегатів (ГПА). Значну частину парку ГПА (рис. 6, а) газотранспортної системи країни становить обладнання, виготовлене кілька десятиліть тому, і терміни його експлуатації закінчуються. Для діагностування стану газоперекачувального обладнання проведено термографічне обстеження низки об’єктів на газовидобувному комплексі. Результати досліджень виявили, що великий вплив мають неточність позиціонування тепловізора під час зйомки, неоднорідність випромінювальної здатності на поверхні об’єкта та наявність відбитку від зовнішніх джерел [13]. Запропоновано порівнювати температурні поля за їхніми гістограмами, які є стійкішими до впливу перешкод. Термограма об’єкта з математичного погляду є матрицею зі значеннями температури кожного пікселя зображення. Таку матрицю можна розглядати як вибірку і застосовувати до її аналізу статистичні методи. Запропоновано статистичний підхід для обробки термограм, заснований на принципі визначення найбільш ймовірного значення температури поверхні об’єкта або його фрагменту, який би враховував як статистичні властивості поверхні, що випромінює, так і параметри використаної тепловізійної апаратури [14]. Термограми і гістограми обраних однотипних вузлів ГКН (компресорних циліндрів) показані на рис. 6, в, г.

Для проведення діагностування вузлів ГКН шляхом порівняння гістограм їхніх температурних полів здійснено такі заходи [14]:

- створено віртуальний еталонний зразок обраного вузла агрегату (модель теплових процесів, що відбуваються в об’єкті контролю);
- вибрано відповідні критерії (інформативні ознаки) для порівняння температурних полів аналогічних вузлів;
- сформовано вирішальне правило, яке вказує на те, яке саме відхилення обраних інформативних ознак від еталонного значення свідчить про дефектність контролюваного вузла.

Результати діагностування вузлів за вирішальним правилом з урахуванням мінімізації помилки вказали на дефектність 21 вузла з 104 розглянутих. Запро-

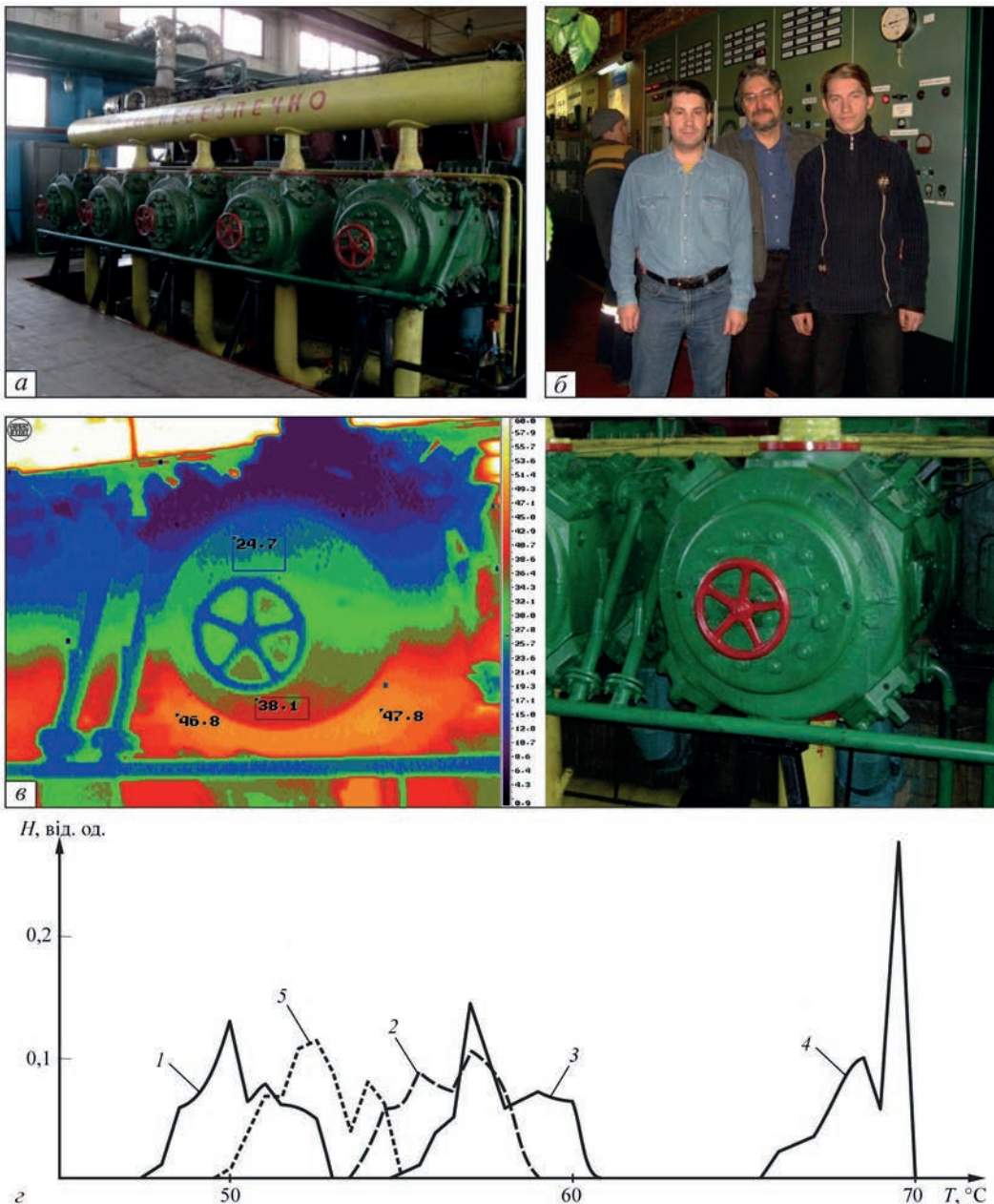


Рис. 6. Діагностування вузлів газоперекачувальних агрегатів: газоперекачувальний агрегат ГКН-10 (а); термографісти – Р.П. Орел, С.М. Мешков, О.В. Мякий (б); термограма компресорного циліндра (КЦ) (в); огинаючі нагнітальних клапанів 5-ти КЦ агрегату № 1 (4-й клапан дефектний) (г)

понований метод статистичної обробки зображень температурних полів дає змогу здійснювати оперативну діагностику технічного стану однотипного обладнання. Метод може знайти застосування в багатьох секторах промислового виробництва: енергетиці, машинобудуванні, нафтогазовому комплексі.

Важливим виробничим завданням газового комплексу є визначення вмісту рідкої фази у газопроводах. На одній із ділянок газопроводу було проведено дослідження. Для розшифрування термограми побудовано теплофізичну модель із дефектом (рис. 7, а) і проведено моделювання процесу [15]. Розрахунки параметрів моделі показали, що за певних співвідношень температур теплоносія і навколишнього середовища перепад температур

на поверхні труби може перевищувати поріг чутливості тепловізора (рис. 7, б, в). Аномалія поверхневої температури може становити кілька градусів, що є достатнім для чіткої реєстрації рівня рідкої фази в певному місці трубопроводу.

Багато гідротехнічних споруд (греблі, дамби) в Україні потребують ретельного контролю технічного стану. Для проведення такого контролю поряд із традиційними (регламентованими) засобами і методами розглянуто можливість застосування термографії. Під час зведення гравітаційних гребель екзотермія, а також коливання температури зовнішнього повітря викликають у бетонному масиві значні температурні напруги, в результаті чого виникають тріщини, які можуть значно зміни-

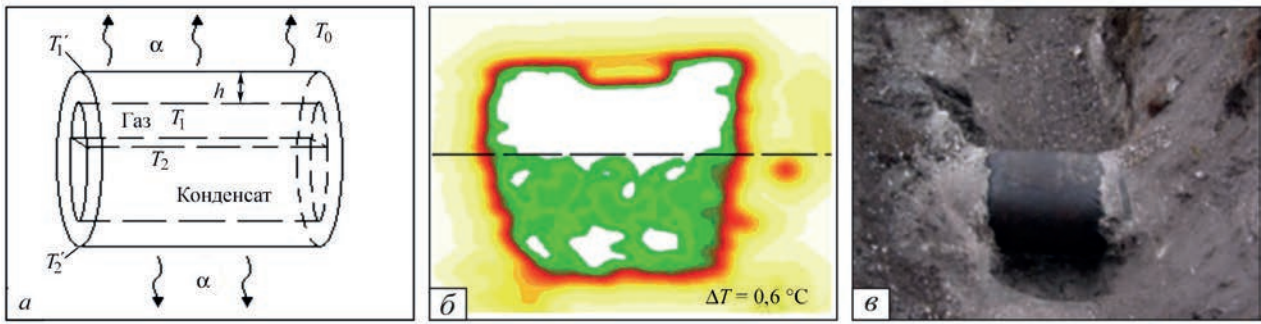


Рис. 7. Визначення вмісту рідкої фази в газопроводах: теплофізична модель газопроводу з конденсатом (а); оброблена термограма (б); ділянка трубопроводу (в)

ти схему статичної роботи споруди і знизити його несучу здатність. Тому нерівноважне температурне поле тіла греблі є однією з інформативних ознак, яку використовують для оцінювання показників міцності гідротехнічних споруд.

У межах спільного проекту з НДІ Укргідропроєкт (м. Харків) перед колективом НТЦ було поставлено завдання провести термографічне обстеження гідротехнічних споруд Дніпровської ГЕС [16]. Основою методики проведення обстеження був ГОСТ 26629–85 «Будівлі та споруди. Метод тепловізійного контролю теплоізоляції огорожувальних кон-

струкцій» (нині ГОСТ Р 54852–2011, аналог ISO 6781–83) і накопичений досвід термографічного обстеження великогабаритних об'єктів енергетики та будівництва. Обстеження полягало у проведенні зовнішнього та внутрішнього термографування. Об'єктами внутрішнього термографування були: верхня потерна водозливної греблі, галереї щитової стінки ГЕС-1 і машинного залу ГЕС-2. Об'єктами зовнішнього термографування були: щитова стінка ГЕС-1, водозливна гребля, водоводи ГЕС-2. Схему проведення термографічного обстеження показано на рис. 8, а. З'ясувалося, що температура води

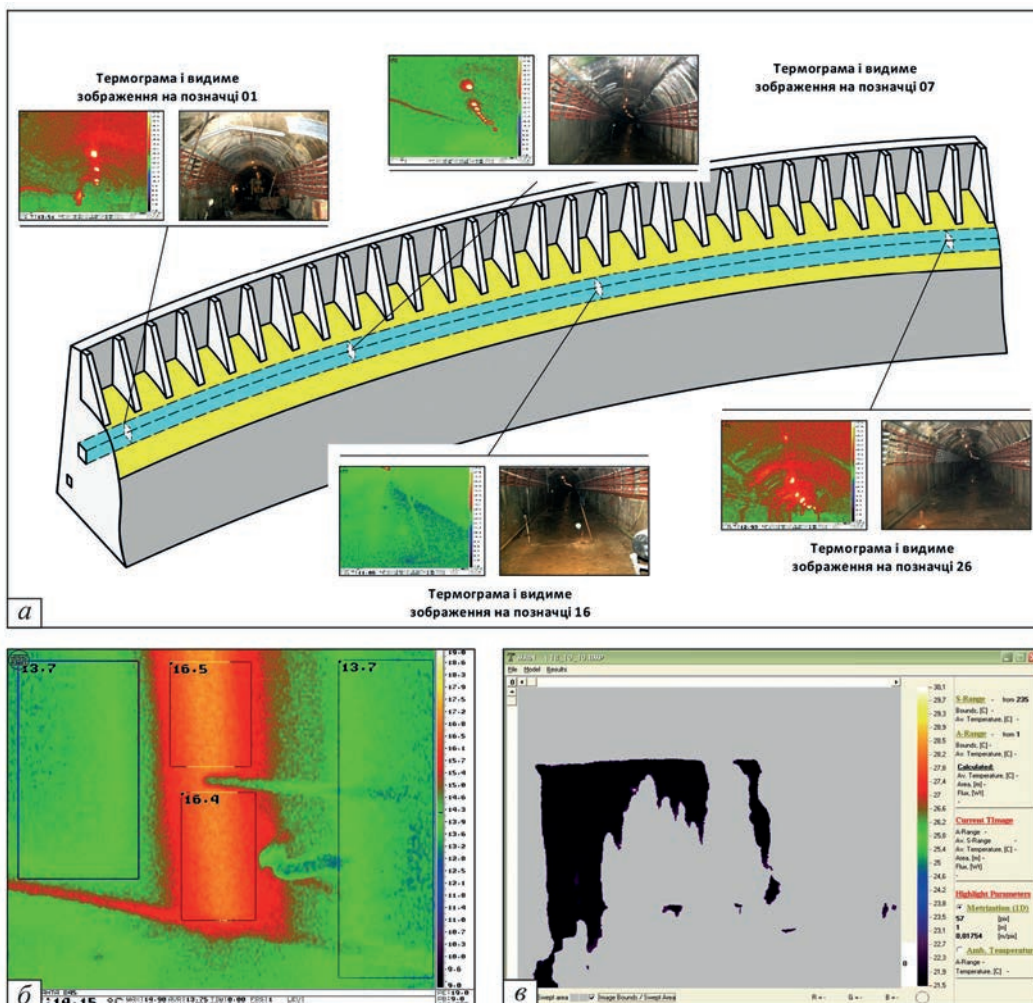


Рис. 8. Термографування гідроспоруд: схема огляду верхньої потерни (а); інфільтрація води біля позначки 36 (б); інтерфейс програми «Thermo V1 05» для розрахунку площі зволених ділянок (в)

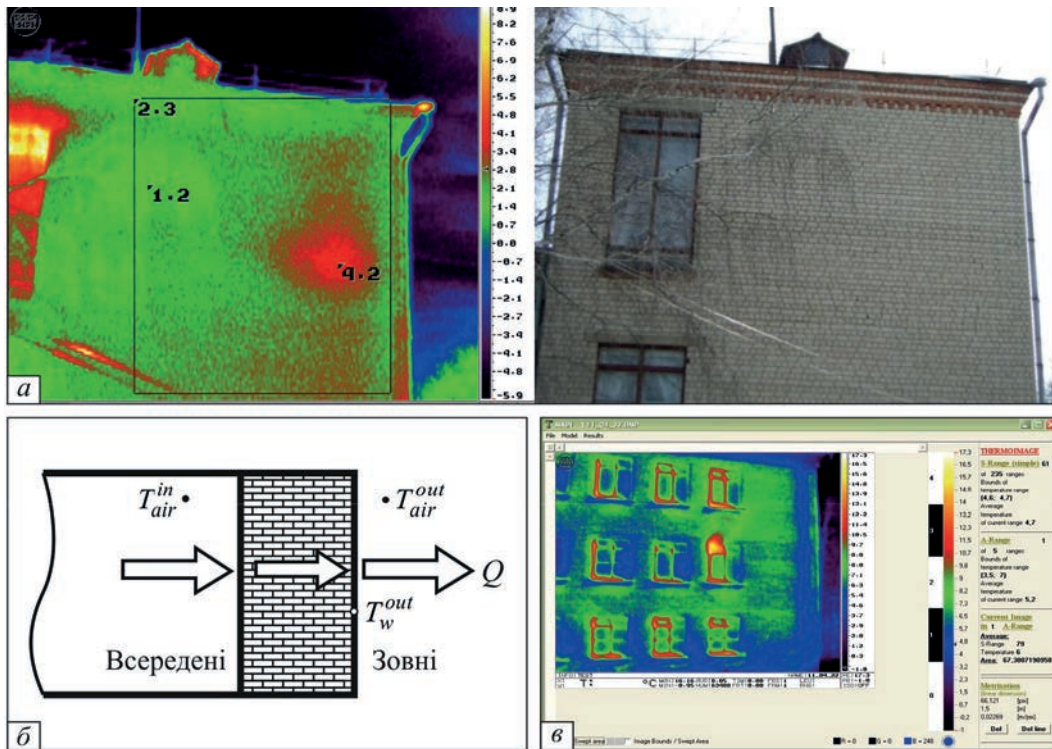


Рис. 9. Визначення теплових втрат: термограма будівлі школи-інтернату (сел. Кочеток) (а); схема і параметри для визначення теплових втрат (б); інтерфейс програми «ThermoSquare v.1.0» (в)

на різних ділянках відрізняється. На всіх ділянках із підвищеною середньою температурою виявлено фільтрацію води з температурою на 2...4 °С вище.

Температура «гарячої» води відрізняється від води, яка постійно протікає по всій довжині потерни (рис. 8, б). Такі відмінності температури води пояснюються різною швидкістю її інфільтрації. Отже, виявлені теплові аномалії вказують на деякі порушення цілісності тіла греблі. Продуктивність термографічного методу дає змогу проводити температурний моніторинг і створювати теплові паспорти гідроспоруд України [17]. Подальшим напрямом досліджень може бути вдосконалення апарату обробки термограм з метою підвищення їхньої інформативності та створення баз даних щодо кожного об'єкта з використанням розробленої програми «Thermo V1 05» (рис. 8, в).

Велике значення у технічній політиці держави має енерго- та ресурсозбереження. Комунально-побутовий сектор становить 30 % загального потенціалу економії паливно-енергетичних ресурсів країни, тому велика роль відводиться економії тепла на опалення житлових та адміністративних будинків.

У сучасній тепловізійній практиці в основному превалює якісна картина та існує певний розрив між теоретичними аспектами теплопередачі та практичними обстеженнями будівель і споруд. Останнім часом розвивається тенденція кількісної інтерпретації результатів. Термографісти НТЦ на основі теплофізичного підходу кількісно оцінили теплові втрати низки житлових і адміністративних будівель (рис. 9) після їхньої тепловізійної зйомки [18, 19].

Отримані термограми (рис. 9, а) обробляли за допомогою програми підрахунку площ «ThermoSquare v.1.0» (рис. 9, б, в) і стандартного програмного забезпечення тепловізора. Наприклад, оцінені теплові втрати будівлі гуртожитку університету становили 364 Гкал/рік. [19]. Порівняння з фактичними витратами за лічильником тепlopункту показало, що розрахована оцінка на 32 % вища. Розбіжності, близькі до цього результату, отримані й іншими авторами, які використовували зазначену методику в своїх дослідженнях [20].

Висновки

Дослідження в області теплової діагностики, проведені НТЦ «Термоконтроль», показали ефективність методу під час виявлення дефектів та оцінювання стану великої кількості об'єктів, перелік яких постійно поповнюється.

Застосування теплового методу під час діагностування стану металу трубопроводів можна визначити як експрес-контроль, що дає змогу швидко встановлювати за температурними аномаліями області для детального вивчення іншими, більше точними методами. Це дасть змогу економити час, підвищити якість і оперативність контролю. Тепловізійний моніторинг дозволить визначати ділянки першочергових досліджень з метою оптимізації обсягу контролю.

Розроблені теоретичні аспекти та методики проведення тепловізійних обстежень мають великі перспективи застосування у трубопровідному транспорті. Крім нафтогазового

комплексу великою потенційною сферою застосування теплового методу є міське комунальне господарство.

Показано ефективність сучасних статистичних методів для діагностування технічного стану однотипного газоперекачувального обладнання. Застосування запропонованої методики може бути поширено на інші види машин і механізмів.

Проведені термографічні обстеження об'єктів Дніпровської ГЕС дали змогу створити теплову картину гідроспороди. Тепловізійний моніторинг може бути важливою частиною діагностичних методів оцінювання стану тіла греблі.

Для вирішення проблеми теплозбереження термографія не має альтернативи. Показано, що застосування теплофізичного підходу дає змогу кількісно оцінювати теплові втрати.

Теплофізичний підхід, який застосовується під час діагностування, дав змогу перейти до кількісного оцінювання стану досліджуваних об'єктів. Це є великим кроком до прогнозування залишкового ресурсу об'єктів із великим експлуатаційним напруженням.

Список літератури

1. Стороженко В.А., Маслова В.А. (2004) *Термографія в діагностиці та неінвазивному контролі*. Харків, Сміт.
2. Волков Я.А., Денисов С.С., Стороженко В.А. (1975) Оптико-електронне устрійство для реєстрації теплових полів. *Прибори та техніка експеримента*, **5**, 36.
3. Стороженко В.А., Денисов С.С., Волков Я.А. і др. (1977) Тепловизор з одноосевим оптико-механічним скануванням. *Оптико-механічна промисловість*, **12**, 23–24.
4. Рапопорт Д.А., Стороженко В.А., Денисов С.С. (1979) Оптико-електронне устрійство для реєстрації термопрофилей. *Прибори та техніка експеримента*, **5**, 268.
5. Стороженко В.А., Мешков С.Н., Денисов С.С. (1985) Бесконтактний контроль теплових режимів погрузних електродвигателів. *Дефектоскопія*, **10**, 86–87.
6. Стороженко В.А., Мешков С.Н., Денисов С.С., Чижов В.Н. (1989) Комплект измерительной аппаратуры для ТНК. *Там же*, **3**, 94–96.
7. Стороженко В.А., Денисов С.С., Мешков С.Н. і др. (1989) Радиометр для теплового контролю з улучшеними експлуатаційними характеристиками. *Там же*, **4**, 85–86.
8. Стороженко В.А. (1991) Радиометр «РАД-1» для теплової діагностики енергоустановок. *Там же*, **9**, 93–94.
9. Meshkov, S.N., Orel, R.P. (2017) Thermal Control for Metal Condition Testing in Pipelines of Nuclear Power Plant. *Metrology and Metrology Assurance 2017. Proceedings of the symposium, Sozopol, Bulgaria*, pp. 112–118.
10. Вавилов В.П. (2009) *Інфрачервона термографія та теплового контролю*. Москва, Спектр.
11. Стороженко В.А., Мельник С.І., Кухарев Ю.А. (2001) Новые методики для анализа информации при тепловом контроле трубопроводов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 45–48.
12. Стороженко В.А., Мельник С.І., Кухарев Ю.А. (2002) Повышение информативности теплового метода контроля трубопроводов. *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів*. Зб. наук. пр., Львів, **7**, 166–169.
13. Стороженко В.О., Мешков С.М., Саприкин С.О., Орел Р.П. (2007) Застосування термографії для діагностики технічного стану газоперекачувального обладнання. *Методи та прилади контролю якості*, **18**, 7–9.
14. Стороженко В.А., Малик С.Б. (2009) Температурная диагностика машин и механизмов на основе статистического подхода. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 33–35.
15. Стороженко В.А., Мешков С.Н., Саприкин С.А., Мягкий А.В. (2009) Применение термографического метода контроля для определения содержания жидкой фазы в газопородах. *Методи та прилади контролю якості*, **23**, 12–15.
16. Мешков С.Н., Орел Р.П., Маслова В.А. (2006) Термографическое обследование гидротехнических сооружений Днепровской ГЭС. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 56–60.
17. Мешков С.М., Герасимович Н.М., Смеляков К.С. (2006) Термографування гідротехнічних споруд Дніпровської ГЕС. Ч. 2. Внутрішнє термографування. *Гідроенергетика України*, **3**, 31–33.
18. Стороженко В.А., С.Б. Малик (2007) Экспресс-метод оценки теплотерь в зданиях путем термографического обследования. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 49–50.
19. Meshkov, S.N., Orel, R.P., Korotenko, A.E. (2019) Heat losses estimation of buildings and constructions by thermographic examination. In: *Proc. of Int. Symposium on Metrology and Metrology Assurance 2019, (Sozopol, Bulgaria)*, 105–108.
20. Вавилов В.П. (2010) Пессимистический аспект тепловизионного энергоаудита строительных сооружений. *Дефектоскопия*, **12**, 49–54.

References

1. Storozhenko, V.A., Maslova, V.A. (2004) *Thermography in Diagnostics and Non-Destructive Testing*. Kharkov, Smit [in Russian].
2. Volkov, Ya.A., Denisov, S.S., Storozhenko, V.A. (1975) Optical-electronic device for registration of thermal fields. *Pribery i Tekhnika Eksperimenta*, **5**, 36 [in Russian].
3. Storozhenko, V.A., Denisov, S.S., Volkov, Ya.A., Bedraty, V.I., Rapoport D.A. (1977) Thermal imager with single-axis optical-mechanical scanning. *Optiko-Mekhanicheskaya Promyshlennost*, **12**, 23–24 [in Russian].
4. Rapoport, D.A., Storozhenko, V.A., Denisov, S.S. (1979) Optical-electronic device for registration of thermal profiles. *Pribery i Tekhnika Eksperimenta*, **5**, 268 [in Russian].
5. Storozhenko, V.A., Meshkov, S.N., Denisov, S.S. (1985) Contactless test of thermal conditions of submersible electric motors. *Defektoskopiya*, **10**, 86–87 [in Russian].
6. Storozhenko, V.A., Meshkov, S.N., Denisov, S.S., Chizhov, V.N. (1989) Set of measuring instruments for NDT. *Ibid.*, **3**, 94–96 [in Russian].
7. Storozhenko, V.A., Denisov, S.S., Meshkov, S.N., Chizhov, V.N., Galkin, A.V., Piskunova, L.E. (1989) Radiometer for thermal monitoring with improved performance. *Ibid.*, **4**, 85–86 [in Russian].
8. Storozhenko, V.A. (1991) Radiometer “RAD-1” for thermal diagnostics of power plants. *Ibid.*, **9**, 93–94 [in Russian].
9. Meshkov, S.N., Orel, R.P. (2017) Thermal control for metal condition testing in pipelines of nuclear power plant. In: *Proc. of Int. Symposium on Metrology and Metrology Assurance 2017, (Sozopol, Bulgaria)*, 112–118.
10. Vavilov, V.P. (2009) *Infrared Thermography and Thermal Control*. Moscow, Spektr [in Russian].
11. Storozhenko, V.A., Mel'nik, S.I., Kukharev, Yu.A. (2001) New procedures for information analysis in thermal control of pipelines. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 45–48 [in Russian].
12. Storozhenko, V.A., Mel'nik, S.I., Kukharev, Yu.A. (2002) Increasing the information content of the thermal method of pipeline inspection. In: *Physical methods and means of control of media, materials and products, Zb. Nauk. Prats, Lviv*, **7**, 166–169 [in Russian].
13. Storozhenko, V.O., Meshkov, S.M., Saprykin, S.O., Orel, R.P. (2007) Application of thermography for diagnostics of

- the technical state of gas-pumping equipment. *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, **18**, 7–9 [in Ukrainian].
14. Storozhenko, V.A., Malik, S.B. (2009) Temperature diagnostics of machines and mechanisms based on a statistical approach. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 33–35 [in Russian].
 15. Storozhenko, V.A., Meshkov, S.N., Saprykin, S.A., Myahkyi, A.V. (2009) Thermographic control method to determine the content of the liquid phase in gas pipelines. *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, **23**, 12–15 [in Russian].
 16. Meshkov, S.N., Orel, R.P., Maslova, V.A. (2006) Thermographic examination of hydraulic structures of the Dnieprovskii HPS. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 56–60 [in Russian].
 17. Meshkov, S.M., Gerasymovych, N.M., Smelyakov K.S. (2006) Thermography of hydraulic engineering equipment of the Dnieprovskii HPS. Pt 2: Internal thermography. *Gidroenergetyka Ukrainy*, **3**, 31–33 [in Ukrainian].
 18. Storozhenko, V.A., Malik, S.B. (2007) Express-method of evaluation of thermal losses in buildings by thermographic examination. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 49–50 [in Russian].
 19. Meshkov, S.N., Orel, R.P., Korotenko, A.E. (2019) Heat losses estimation of buildings and constructions by thermographic examination. In: Proc. of Int. Symposium on *Metrology and Metrology Assurance 2019, (Sozopol, Bulgaria)*, 105–108.
 20. Vavilov, V.P. (2010) Pessimistic aspect of thermal imaging energy audit of building structures. *Defektoskopiya*, **12**, 49–54 [in Russian].

EXPERIENCE OF RESEARCH AND TECHNICAL CENTER «THERMOCONTROL» IN THE AREA OF THERMAL NON-DESTRUCTIVE TESTING

V.O. Storozhenko, S.M. Meshkov, R.P. Orel, O.V. Miahkyi

RTC «Thermocontrol» of Kharkiv National University of Radio Electronics, 14 Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine.
E-mail: volodymyr.storozhenko@nure.ua

The main results of research and development in the field of creating technologies for the thermal control method carried out at the Research and Technical Center «Thermocontrol» of the Kharkiv National University of Radioelectronics since 1973 and up to the now, are presented. The results of application of thermal technologies for diagnosing bearing wear and electrical insulation faults in submersible electric motors of the SEM series used for oil production are shown. The results of monitoring the condition of metal in pipelines of the NPP unit rooms are given. It turned out that the defects caused by cavitation erosion have a “heat trace” and can be registered by the thermal method. The technology for diagnosing underground pipelines and leaks in them is described. A method of statistical processing of the results of thermal diagnostics of gas-pumping units of main gas pipelines has been developed, which includes creation of a virtual reference sample of the selected part of the unit; informative features for comparing temperature fields were formed; a decision rule was formulated, which indicates the deviation of the selected informative features from the reference value. The results of calculating the level of the liquid phase in gas pipelines have been experimentally confirmed. The results of a thermographic survey of the hydrotechnical structures of the Dnieper HPP are presented. The quantitative indicators of heat losses of buildings during thermal imaging inspection are given. The directions and prospects of the development of the thermal method are considered. Ref. 20, Fig.9

Key words: thermal non-destructive testing, thermal diagnostics, submersible motors, underground pipelines, cavitation erosion, hydraulic structures, heat losses

Надійшла до редакції 02.02.2021

НОВА КНИГА

Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд: Збірник наукових статей за результатами, отриманими у 2016–2020 рр. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – Київ, 2020. – 712 с.



До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2016–2020 рр., до реалізації якої було залучено інститути НАН України. Мета програми – створення нових матеріалів з подовженим ресурсом роботи, розроблення наукових положень управління надійністю і довговічністю відповідальних об'єктів, створення ефективних методів, технічних засобів і технологій для оцінки і подовження ресурсу обладнання провідних галузей промисловості, нафто- та газопроводів, мостів, будівельних і транспортних конструкцій.

Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

З книгою можна ознайомитись в бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Попередні чотири випуски збірників «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, споруд та машин» у відкритому доступі за посиланням: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/compilations>.

ЗМІСТ

- РОЗДІЛ 1.** Розробка методологічних основ оцінки і подовження ресурсу конструктивних елементів об'єктів підвищеної безпеки та авіакосмічної техніки.
- РОЗДІЛ 2.** Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації.
- РОЗДІЛ 3.** Розробка методів захисту від корозії елементів конструкцій об'єктів тривалої експлуатації.
- РОЗДІЛ 4.** Розробка ефективних методів оцінки та подовження ресурсу об'єктів атомної енергетики.
- РОЗДІЛ 5.** Розробка методологічних основ оцінки і подовження ресурсу конструктивних елементів об'єктів підвищеної безпеки та авіакосмічної техніки.
- РОЗДІЛ 6.** Створення систем моніторингу технічного стану трубопроводів і об'єктів газо- та нафтопереробної промисловості.
- РОЗДІЛ 7.** Підвищення надійності та подовження ресурсу мостів, будівельних, промислових і транспортних конструкцій.
- РОЗДІЛ 8.** Розробка технологій ремонту та відновлення елементів конструкцій об'єктів підвищеної безпеки з метою подовження терміну їх експлуатації.
- РОЗДІЛ 9.** Матеріали з подовженим ресурсом роботи для екстремальних умов експлуатації.