

## МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ТЕПЛОМЕРЕЖ ІЗ ЗАСТУВАННЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

*Ковтун С.І., Запорожець А.О., Сергієнко Р.В.  
 Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ*

Основним завданням при експлуатації теплових мереж є забезпечення надійного та безперебійного теплопостачання споживачам із заданими технологічними параметрами. Зношення та старіння обладнання роблять його експлуатацію небезпечною, а періодичний контроль штатними засобами часто не може забезпечити належний рівень експлуатаційної надійності, або його проведення пов'язано з великими втратами часу на підготовчі роботи. Багато аварій на тепломережах викликані земляними роботами, недостатньою пропускну здатністю систем, корозією, погодними умовами, механічними поломками, ушкодженнями системи, помилками операторів і стихійними лихами. Тому все помітнішою стає тенденція переходу від періодичного контролю таких об'єктів до їх безперервного моніторингу.

Для визначення технічного стану теплових мереж (як підземних, так і надземних) в процесі експлуатації може використовуватися кілька видів контролю та найбільш перспективним при реалізації процесу моніторингу є тепловий контроль [1, 2]. Тепловий контроль здійснюється за допомогою теплової аерозйомки, наземним тепловізійним скануванням, безконтактним, контактним і теплотричними методами. Переваги та недоліки цих методів систематизовано в таблиці 1.

Таблиця 1. Переваги і недоліки методів діагностування технічного стану теплових мереж

Метод	Інформативний параметр	Переваги	Недоліки
Теплова аерозйомка	Термограма (кольорова чи чорно-біла)	Оперативність, одночасне обстеження великих площ, запис та аналіз даних	Дослідження тільки в нічний час, вплив теплової енергії зовнішніх джерел, висока вартість, відсутність нормативів
Наземне тепловізійне сканування	Термограма (кольорова чи чорно-біла)	Оперативність, точне визначення місця дефекту, оцінка якості теплоізоляції, одночасне обстеження великих площ, запис та аналіз даних	Висока вартість, вплив теплової енергії зовнішніх джерел, необхідність постійного налаштування, дослідження тільки при низьких температурах
Безконтактний тепловий контроль	Тепловий потік	Оперативність, точне визначення місця дефекту, оцінка якості теплоізоляції	Вплив теплової енергії зовнішніх джерел, необхідність постійного налаштування, невелика площа контролю
Контактний тепловий контроль	Температура поверхні ґрунту	Точне визначення місця дефекту, оцінка якості теплоізоляції	Вплив теплової енергії зовнішніх джерел, значна похибка визначення місця дефекту, низька продуктивність
Теплотричний метод	Температура поверхні ґрунту, тепловий потік	Точне визначення місця дефекту, оцінка якості теплоізоляції	Тривалість дослідження, вплив теплової енергії зовнішніх джерел, відсутність нормативів

Теплометричні системи моніторингу дозволяють на ділянках діючих тепломереж визначати локалізацію місць течії теплоносія та виявляти ділянки мереж з ушкодженою або сильно зволоженою ізоляцією теплопроводів, а також з незадовільним станом їхніх огорожувальних конструкцій [3, 4]. Будь-яке порушення стану теплової ізоляції трубопроводів, а також режиму їхньої роботи приводить до зміни теплових (температурних) полів у поверхневому шарі ґрунту (покриття) над прокладкою. У випадку зволоження ізоляції або її повного руйнування на поверхні ґрунту виникає підвищений, але рівномірний тепловий слід.

Для контролю стану підземних теплових мереж також застосовують дистанційний метод вимірювання поля температури на поверхні ґрунту над теплотрасою шляхом інфрачервоної-термографічної зйомки теплових мереж. Найбільший досвід застосування таких систем моніторингу накопичений в скандинавських країнах, особливо в Данії та Фінляндії [5, 6]. Місця прихованих витоків теплоносія ідентифікують або по спотворенню регулярних температурних профілів, або шляхом порівняння вимірних значень температури з розрахунковими, отриманими методом математичного моделювання можливих порушень теплового режиму мереж (дефектів). Такий метод теплового контролю придатний для виявлення ділянок теплотрас з підвищеними тепловтратами, зумовленими збільшенням коефіцієнта тепловіддачі внаслідок зволоження або руйнування теплової ізоляції, затоплення каналу водою і т.д.

Фізичною передумовою дистанційної індикації теплових полів магістральних тепломереж є формування на земній поверхні аномалії, величина якої залежить від температури теплоносія, діаметра і стану теплопроводів, глибини залягання, фізичних властивостей ґрунту і метеоумов на земній поверхні.

На сьогоднішній час тепла аерофотозйомка широко використовується для діагностування підземних систем теплопостачання міст. Багаторічний досвід інтерпретації матеріалів теплової аерозйомки показує, що наявність системи калібрування тепловізійних даних суттєво підвищує їх інформативність. Для об'єктів теплоенергетики, в першу чергу підземних теплотрас – це оцінка рівня тепловтрат в навколишнє середовище, більш ефективний моніторинг стану тепломереж, об'єктивна оцінка шляхів розвитку міського теплопостачання. В першу чергу, потрібно виявити ділянки аномальних втрат на тепломережах, де аномалії перевищують заздалегідь заданий для них температурний контраст, таким чином підвищиться вірогідність діагностики.

Перспективним для моніторингу технічного стану теплових мереж є застосування безпілотних літальних апаратів. Вдосконалення системи моніторингу стану тепломереж на базі безпілотних літальних апаратів дає змогу оперативно встановлювати місця можливих розривів трубопроводу чи витоків теплоносія під поверхневим шаром ґрунту.

Для забезпечення ефективного контролю стану теплових мереж, потрібно проводити територіальну аерозйомку по мережі паралельних маршрутів чи маршруту аерозйомки окремих трубопроводів. Під час польоту використовується спеціальне навігаційне програмне забезпечення, що дозволяє спостерігати на екрані монітора положення квадрокоптера щодо запроєктованих маршрутів за даними GPS. При заході на черговий маршрут вмикаються тепловізійна апаратура та цифрова камера, що проводять запис інформації. Момент вмикання реєструється у вигляді часової позначки на траєкторії руху у базі даних аерозйомки. За допомогою спеціального програмного забезпечення проводиться попередній контроль якості зображення тепловізійних знімків теплових мереж.

За наявності в тепломережі прямих та зворотних труб слід очікувати тільки один температурний максимум, тобто в температурному полі поверхні ці труби не розділяються. Недотримання проектної глибини прокладання труб підземних теплотрас може контролюватися за допомогою теплової аерозйомки і на тепловому зображенні може

виражатися в поступовій зміні інтенсивності температурної аномалії над теплотрасою. Вплив метеорологічних умов на температурне поле над теплотрасою та управління квадрокоптером достатньо значний, тому слід проводити теплову аерозйомку при незначній швидкості вітру.

Діаметр ізоляованої труби також впливає на можливість дистанційної індикації її теплового стану. При справному технічному стані тепломережі труби малих діаметрів створюють слабкі температурні аномалії (близько  $+1^{\circ}\text{C}$ ) і не можуть реєструватися тепловою аерозйомкою з високою надійністю.

Аналіз впливу температури гарячої води на температуру поверхні показує, що намокання ізоляції повинно призводити до значного підвищення (на  $1,5-2^{\circ}\text{C}$ ) температури поверхні, що може бути надійно зафіксовано. При цьому за допомогою теплової аерозйомки можна виявляти витoki теплоносія з теплових мереж, що відбулися від декількох днів до 2-3 тижнів та більше в залежності від глибини залягання труб. Зйомка повинна проводитися в умовах відсутності прямого сонячного засвічення (в хмарну погоду або нічний час доби) не раніше ніж через 10 днів після виходу системи теплопостачання на номінальний режим при відсутності сніжного покриву (або на 2-3 добу після випадіння опадів з товщиною снігового покриву не більше 5 см). Оптимальна висота польоту залежить від типу тепловізійного пристрою та встановлюється в діапазоні 350-400 м.

Для апробації запропонованого методу моніторингу технічного стану трубопроводів теплових мереж і проведення експериментальних досліджень було застосовано апаратний комплекс, представлений на рис. 1.

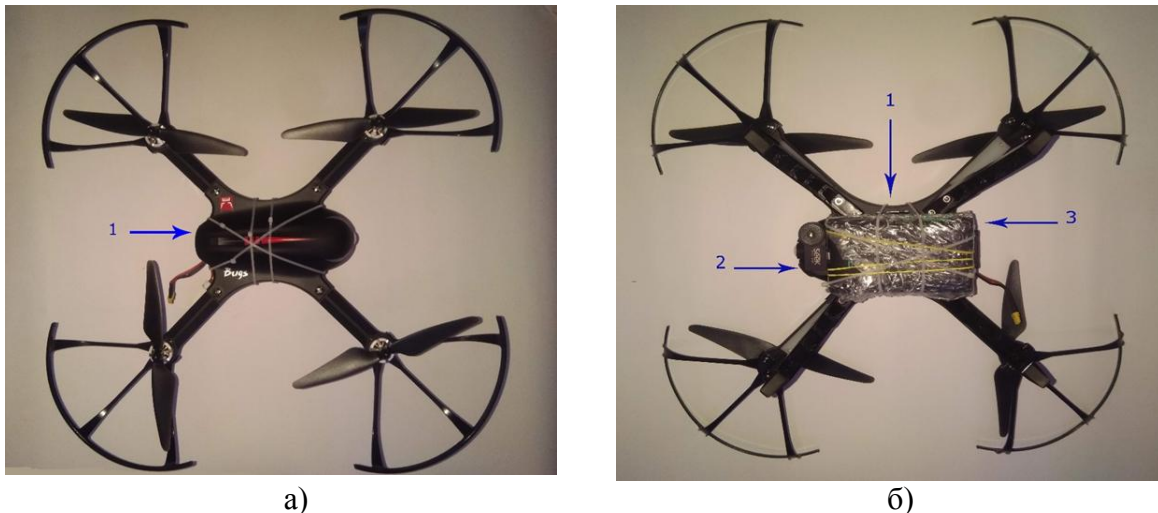


Рис.1. Апаратний комплекс для моніторингу технічного стану магістральних трубопроводів: а) вид зверху; б) вид знизу; 1 – безпілотний літальний апарат, 2 – тепловізійна камера; 3 – комунікаційний пристрій

Як безпілотний літальний апарат обрано модель *MJX BUGS 3* мультироторного типу, що призначений як для аерофотозйомки, так і для швидких, динамічних польотів. Технічні характеристики квадрокоптера *MJX BUGS 3* представлено в табл. 2.

Квадрокоптер оснащується безколекторними моторами типу *MT1806* потужністю 1800кв. Виробник характеризує їх як економічні та ефективні серед однотипних безколекторних моторів. Кожен мотор забезпечує тягу в 230 грамів. Також в даному квадрокоптері наявні регулятори швидкості *ESC* з автоматичним захистом від заклинювання, що виключають можливість вигорання моторів. Як згадувалося вище, в комплекті з дроном наявний безвісний підвіс з можливістю ручного регулювання по вертикалі, що адаптований під інсталяцію невеликого вантажу. Відстань від землі до підвісу складає 80 мм.

Живлення квадрокоптера здійснюється 2S Li-Po-акумулятором ємністю 1800 мА·год зі струмом розряду 25С та конектором XT30. Згідно специфікації, батарея забезпечує 19 хвилин безперервного польоту.

Таблиця 2. Технічні характеристики квадрокоптера MJX BUGS 3

Тип	Характеристика
Стабілізація	6-осний гіроскоп
Частота радіосигналу	2,4 ГГц
Живлення трансмітера	4xAA, 1,5 В
Підвіс	Безосьовий, адаптований під камеру
Мотори	Безколекторні, типу MT1806 1800 KV
Батарея	2S 7,4В 1800 мАч 25С LiPo
Час польоту	до 19 хвилин
Час заряджання	≈ 240 хвилин
Матеріал	нейлонове волокно
Маса (з навісом)	472 гр

До комплексу квадрокоптера також входить апаратура, що працює на частоті 2,4 ГГц. Її відмінною особливістю є функція інтелектуального дистанційного управління, що сповіщає про низький заряд акумулятора чи про велику віддаленість дрону від апаратури. Її живлення здійснюється за допомогою 4 батарей формату AA. Максимальна віддаленість дрону від апаратури складає 300-500 метрів.

Під час польотних випробувань квадрокоптер показав гарні польотні характеристики навіть на акумуляторі типу 2S, що входить до комплексу. 6-вісний гіроскоп працює без збоїв. На практиці час польоту квадрокоптера з максимальним навантаженням склав 8 хвилин. При віддаленості 300 метрів квадрокоптер чітко виконує задані напрямки польоту.

Для проведення експериментів з тепловізійного обстеження трубопроводів теплових мереж на безпілотних літальних апаратах встановлено компактну тепловізійну камеру фірми Seek Thermal™ (USA), яка має ширококутний об'єктив із загальним розміром 2,5 x 4,4 x 2,5 см, з розрізнявальною здатністю 320 x 240. Найбільша відстань становить 610 метрів, а найближча відстань – 15см. Технічні характеристики тепловізійної камери представлено в табл. 3.

Таблиця 3. Технічні характеристики тепловізійної камери Seek Thermal™

Тип	Характеристика
Розширення	206x156
Робоча відстань	до 550 м
Кут огляду	20о
Розмір пікселя	12 мкм
Спектральний діапазон	7,5-14 мкм
Палітри	9 видів

Прикладне програмне забезпечення є одним з основних компонентів систем моніторингу, на нього покладено реалізацію функції взаємодії з модулями апаратного комплексу системи, керування інформаційними потоками всередині системи, реалізацію алгоритмів цифрової та статистичної обробки інформаційних сигналів, побудови зо-

бражень інформаційних полів, формування інтерфейсу користувача, збереження отриманої інформації та вихідних результатів, тощо [7].

Моніторинг протяжних об'єктів (в нашому випадку трубопроводів теплових мереж) пропонується застосовувати шляхом обльоту вздовж об'єкта контролю з використанням безпілотних літальних апаратів мультироторного типу. Це дозволяє отримати якісні фото та тепловізійні зображення ділянки тепломережі як об'єкта контролю для подальшого аналізу. Програмне забезпечення дозволяє використовувати як карту будь-яку топографічну основу. Прив'язка може бути здійснено за двома або кількома точками. Також можливе використання як топологічної основи електронних карт. Програма забезпечує введення, автоматичний контроль і редагування маршруту обльоту. Для кожної точки маршруту може бути задана висота.

Створення мобільних інформаційно-вимірювальних систем на базі БПЛА дає можливість проводити моніторинг стану і динаміки характеристик в часі і в просторі досліджуваного середовища, як в режимах on-line, так і інших режимах. Режим on-line особливо ефективний при аваріях на ділянках просторово-розгалужених тепломереж. При штатному режимі функціонування досліджуваних об'єктів поточний дистанційний контроль є найбільш економним у порівнянні з іншими засобами контролю. Це дає змогу використовувати такий вимірювальний інструментарій для створення необхідних баз даних моніторингу характеристик теплового стану тепломереж для прогнозу їх динаміки.

1. Вацшиак І. Р. Аналіз методів контролю технічного стану підземних теплових мереж / І. Р. Вацшиак, С. П. Вацшиак, О. М. Карпаш, А. В. Яворський // *Нафтогазова енергетика*. – 2010. – №2(13). – С. 64-69.
2. Бабак В. П. Анализ методов диагностирования технического состояния магистральных теплосетей / В. П. Бабак, А. А. Запорожец, С. И. Ковтун, Р. В. Сергиенко / *The Scientific Heritage*. – 2017. – №14. – С. 59-66.
3. Аппаратура и метод определения теплопотерь на участках теплотрасс / А.А.Долинский, Л.В. Декуша, Т.Г. Грищенко, Л.И. Воробьев // *Інновації. Промисловість*, 2007. – № 2. – С. 63-69
4. Haldane D., F. van der Graaf, Lankhorst A.M. A direct measurement system to obtain the thermal conductivity of pipeline insulation coating systems under simulated service conditions // *Offshore Technology conference (Houston, Texas, 3–6 May 1999)*. – 16 p.
5. *Неразрушающий контроль : справочник в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: В.П. Вавилов. Тепловой контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.*
6. Gregory R. Stockton. *Advances in Applications and Methodology for Aerial Infrared Thermography* // *Proc. SPIE 5405, Thermosense XXVI, 124 (April 12, 2004)*.
7. *Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії: Монографія / В.П. Бабак, В.С. Березун ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / - К.: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2016. – 298 с.*