

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗНОШЕНИХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ

Abstract. A set of organizational and technical issues is considered in order to solve the problem of providing the necessary indicators of a quality and safe heat supply in conditions of significant wear of the main part of the pipeline system by using the developed correlation parametric methods, hardware and software for low-frequency acoustic diagnostics of underground pipelines.

Актуальність, постановка задачі

Системи тепло- і водопостачання в Україні характеризуються значною протяжністю. Основна їх частина закладена ще в минулому столітті, більше 50% мереж відпрацювали регламентний термін експлуатації і використовуються понад 30 років. Стан економіки країни не дозволяє в доступному для огляду майбутньому провести кардинальне оновлення міських трубопроводних систем. Містам доведеться протягом десятиліть існувати в цих стресових умовах. На постійному чергуванні знаходяться ремонтні підрозділи, оперативний персонал районів тепломереж – бригади пошуку місць витoku. Саме ці підрозділи своєю щоденною пошуково-ремонтною роботою «рятують» великі міста від надзвичайності даної проблеми. Аналіз проведених планових перекладань ділянок трубопроводів теплових мереж в м. Києві показує, що є і протяжні ділянки трубопроводів, що мають корозійне зношення 1-2%, котрі цілком могли б прослужити ще десятиліття. Це відкриває «вікно можливостей» – адекватна дистанційна діагностика технічного стану ділянок підземних трубопроводів повинна відповісти на питання про можливість та умови їх подальшої експлуатації.

Аналіз завдань діагностування

Забезпечення оперативності виявлення та усунення наскрізних пошкоджень (витоків) теплових мереж.

Забезпечення високої точності і достовірності визначення координат наскрізних пошкоджень трубопроводів.

Перехід від виконання аварійних робіт з виявлення та усунення наскрізних пошкоджень трубопроводів до планово-попереджувальних, точкових ремонтів тепломереж в місцях їхнього небезпечного корозійного стоншення.

Планування до заміни в першу чергу тих ділянок трубопроводів, які є фактично найбільш пошкоджені корозією.

Технічне обґрунтування вибору найбільш пошкоджених місць трубопроводу для шурфувань та визначення саме по цих місцях, за діючими

правилами, граничних режимів експлуатації протяжних ділянок теплових мереж при прийнятті рішень про можливість та умови їх подальшої експлуатації.

Метрологічна підтримка засобів низькочастотного акустичного діагностування підземних трубопроводів.

Вирішення зазначених завдань

Підвищення оперативності виявлення та усунення наскрізних пошкоджень (витоків) тепломереж може бути досягнуте шляхом підвищення ролі персоналу районів теплових мереж (РТМ).

Обслуговуючий експлуатацію трубопроводів персонал РТМ, територіально, знаходиться найближче, ніж інші відповідальні служби та бригади, до пошкоджених ділянок тепломереж. Обхідники РТМ здійснюють періодичний обхід, візуальний огляд теплокамер – чи немає заливки, запарованості та ін. Вони краще за всіх знають об'єкт, трасу прокладки, передісторію. Швидше реагують на сигнали про заливку підвалів будинків і т.п. Знають наявність сторонніх комунікацій та всі особливості організаційного та технічного доступу у піднаглядні теплові камери (ТК). У той час, коли в умовах великого міста спеціалізована аварійна автомобільна бригада з пошуку витоків, нерідко часами, простоє на дорозі у транспортних заторах, коли ця бригада затримується на пошуку непередбачено важкого у визначенні витoku в іншому районі міста, обхідники місцевого РТМ нерідко чекають на місці аварії. Крім того, на практиці, в літній період гідравлічних випробувань тепломереж, спеціалізовані автолабораторії з пошуку витоків найчастіше є дуже перевантаженими.

Тому є доцільним, та цілком можливим, розглянути питання про поширення функціональних можливостей персоналу РТМ, обхідників, у частині самостійного інструментального виявлення місць "нескладних витоків", доля яких становить 40-50 % від всіх ситуацій з пошуку витоків, які потребують інструментального визначення, для цього:

- оснастити персонал місцевих РТМ простими у використанні, надійними та ефективними засобами інструментального контролю наявності витоків і визначення їх місця розташування;
- заохотити персонал РТМ, обхідників, виконувати додаткові діагностичні обов'язки;
- в програми з навчання, обміну досвідом, в інструктажі персоналу РТМ ввести відповідні доповнення.

Додаткові дії та можливості стосовно проведення діагностичних робіт персоналом РТМ

При обході теплотрас до звичайного огляду додаються вимірювання рівнів шуму в контрольних точках на арматурі трубопроводу, значень температури в місцях штатного доступу до трубопроводів. При виявленні ознак наявності витоків сповіщаються відповідні служби і самостійно живаються заходи з пошуку витоків наявним акустичним течешукачем. За

оцінками до 50% витоків може бути виявлено протягом 0,5-1 години.

Керівництво РТМ одержує можливість негайно вжити заходів з ремонту пошкодженої ділянки теплових мереж.

Якщо випадок складний (технічні та організаційні проблеми з виявленням витоків, суперечливі ознаки, недостатній досвід і кваліфікація, підвищена відповідальність, небезпека або суттєві негативні наслідки від помилкових розриттів та ін.), тоді пошук витоків ведеться за допомогою спеціалізованої діагностичної авто лабораторії.

Мінімальні вимоги до інструментального оснащення персоналу РТМ

Рекомендується оснащення обхідників РТМ термоакустичними течешукачами, які повинні дозволяти:

- здійснювати віброакустичні вимірювання на поверхні ґрунту (тверде покриття, пухка поверхня, сніговий покрив), безпосередньо на металевому трубопроводі і елементах запірної арматури з метою виявлення шумів витоків, їх місця розташування і несправностей запірної арматури;

- виявляти температурні аномалії, які викликані витокими теплоносіями і порушенням теплоізоляції, відстежувати трасу прокладки тепломереж, місць витоків і напрямок стікання теплоносія від витоків по каналах.

Спрощення роботи з течешукачем за рахунок автоматизації вимірювань.

Оператор, що працює в складній стресовій обстановці, на проїжджій частині і т.і., не повинен відволікатися на виконання рутинних операцій з управління режимами роботи та з тривалих настроювань параметрів приладу.

- Повинно бути реалізовано автоматичне регулювання посилення для всього динамічного діапазону рівнів вібросигналів. Необхідність в ручному регулюванні повинна бути виключеною.

- Діапазон оцінки рівнів вібрації повинен бути не меншим ніж від $0,01 \text{ м/сек}^2$ до 40 м/сек^2 .

- Обов'язковою повинна бути функція "захисту слуху" оператора від ударних акустичних впливів.

- Забезпечення мінімальної та водночас практично достатньої кількості можливих налаштувань фільтрів, орієнтованих на застосування в різних практичних випадках – вимірювання на ґрунті, на елементах арматури трубопроводу та ін.

- Наявність функції автоматичного визначення мінімального (фонового) рівня шуму в точці вимірювання.

- Наявність цифрової індикації поточного та мінімального рівня віброакустичного шуму.

- Наявність безконтактного вимірювання температури ґрунту з розподільчою здатністю не гірше $0,03^\circ\text{C}$, з точністю не гірше $0,5^\circ\text{C}$.

Особливості конструктивного виконання

Високий ступінь механічної міцності. Наприклад повинно допускатися падіння електронних блоків з висоти 1,2 м на тверде покриття без порушення

конструкції і працездатності.

Герметичне виконання, широкий діапазон робочих температур. Для України мінімальні вимоги: від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Подальше організаційне та технічне підвищення оперативності виявлення витоків за участю РТМ

Додаткові вимоги до перспективних течешукачів при переході до системи масштабного інформаційного забезпечення

– Метрологічна підтримка. Термоакустичні течешукачі повинні проходити добровільну сертифікацію і подальші періодичні, як мінімум внутріфірмові, перевірки (калібрування) аналогічно тим, які проводяться із засобами вимірювання рівня вібрації і температури.

– Створення та супровід електронної бази даних з історії та поточному стану теплових мереж. Метрологічна коректність оцінки інформаційних параметрів (параметри віброакустичних шумів і температури в контрольних точках) на рівні обхідників створює умови для адекватного наповнення і супроводження бази даних РТМ, яка характеризує передісторію та поточний технічний стан ділянок підземних трубопроводів.

– За конструктивним виконанням і функціональним можливостям у перспективних течешукачах в якості блоку оператора доцільно використовувати смартфони. Вони вже зараз є у більшості обхідників, і це практично половина акустичного течешукача. Крім того, ці вироби є у герметичному та у високоміцному виконанні. При такому підході датчики фактично є специфічним бездротовим доповненням до смартфонів. При цьому обсяг додаткового обладнання мінімізується, не виникає необхідності у службовому транспорті на маршруті обходу теплотрас.

– Бездротовий зв'язок з датчиками і з навушниками. Це просто і зручно в експлуатації, надійно – бо не потребує кабелів та роз'ємів.

– Повинна бути реалізована технологія архівування результатів вимірювань (дата, місце – GPS-прив'язка) і автоматизована процедура передачі даних в архів на сервер РТМ.

Додаткові вимоги і можливості щодо організації діагностичної роботи в РТМ

Дані, отримані в контрольних точках при обході теплотрас, архівуються з GPS прив'язкою до місця і часу. Ці дані в режимі реального часу скидаються по мобільному зв'язку на сервер майстра РТМ і фіксуються в базі даних оперативних вимірювань.

Таким чином, виключаються помилки або фальсифікація даних про результати проведених контрольних вимірювань. Наприклад, підвищений рівень шуму, в порівнянні з тим, який раніше спостерігався в даній точці, автоматично фіксується і береться на контроль. Пошкодження фіксуються на ранній стадії їх розвитку, з'являється можливість мінімізації негативних наслідків.

Підвищення точності і достовірності виявлення і усунення витоків теплоносія

Підвищення точності і достовірності визначення координат витоків міських підземних трубопровідних систем може бути досягнуто шляхом суттєвого коригування приладового оснащення і організації робіт спеціалізованих автомобільних діагностичних лабораторій з урахуванням явищ багатохвильового поширення і інтерференції:

- оснащення діагностичних автомобільних лабораторій спеціальним обладнанням для високоефективного пошуку витоків на трубопроводах конкретного типу;

- застосування комплексної методики виявлення пошкоджень, що враховує особливості трубопроводів;

- навчання персоналу з урахуванням специфіки конкретних типів трубопроводів.

Застосування приладового устаткування, яке пристосоване для трубопроводів конкретного типу

В якості ілюстрації можна навести суттєві відмінності трубопровідних систем водо- і тепlopостачання. У теплових мережах Києва в основному використовується канална прокладка трубопроводів, безканална прокладка використовується в невеликих об'ємах, предізолювані труби зустрічаються доки не часто, а в київському водоканалі – в основному безканална прокладка. У системі тепlopостачання Києва застосовується спеціально підготовлена технічна вода, тому внутрішня корозія трубопроводів практично відсутня, зовнішня корозія з'являється в місцях порушення гідроізоляційного покриття труб. У водоканалі – корозія з обох боків, осадові накопичення на внутрішній поверхні труб. В тепломережах суттєво вище ніж у водоканалі робочий тиск, тому й витікання шумлять набагато сильніше. Є відмінності у джерелах та параметрах потужних акустичних завод, номенклатурі труб (матеріал, діаметр, товщина стінки).

Безумовно всі ці відмінності суттєво впливають на ефективність тих чи інших методів визначення витоків. При цьому має місце протиріччя інтересів виробника діагностичного устаткування і його споживача. Виробники зацікавлені в максимальній універсальності свого обладнання і просувають концепцію універсального приладу (це розширює ринок збуту) з можливістю його застосування на трубопроводах всіх можливих типів, споживач – в максимальній пристосованості застосовуваного діагностичного обладнання до своїх завдань, до конкретних умов. В універсальному приладі неминучі компроміси і ускладнення. Для вирішення завдання підвищення достовірності необхідні спеціальні прилади для конкретних умов.

Деякі західноєвропейські кореляційні течешукачі є малоприматними до вітчизняних умов навіть з формальних конструктивних проявів – вібродатчики можуть працювати на кабель довжиною до 2,5 м, що є недостатнім для застосування у ТК вітчизняних тепломереж.

Як показали результати проведених досліджень і виробничої експлуатації на трубопроводах теплопостачання м. Києва нових методів і теплешукового обладнання, можна рекомендувати такий комплект основного діагностичного обладнання для автомобільної лабораторії трубопроводів теплопостачання:

- кореляційний течешукач К-10 [1], в якому на апаратному, програмному та методичному рівнях передбачено застосування параметричного методу визначення координат витоків з урахуванням багатохвильової структури акустичних даних, вібродатчики з вбудованим підсилювачем забезпечують роботу на кабель довжиною не менше 10 м, радіоканали забезпечують надійну передачу вібросигналів з глибоких підвалів в міських умовах на відстань не менше 600 м;

- термоакустичний течешукач А-10Т [2], пристосований для контактного вимірювання рівня віброакустичного сигналу і безконтактного вимірювання температури на ґрунті та безпосередньо на трубопроводі;

- діагностичний зонд для візуального і параметричного обстеження стану трубопроводів, прокладених в непрохідних каналах ДЗ-1 [3];

- додаткове універсальне обладнання – трасошукач, металошукач, ультразвуковий товщиномір, мірне колесо.

Персонал діагностичних автомобільних лабораторій, як правило, працює на аварійних об'єктах систем теплопостачання у важких, навіть стресових умовах. Ціна їх помилок – десятки метрів помилково розкритих трубопроводів, порушених автомобільних магістралей, знищених зелених насаджень, суттєві часові затримки з усунення пошкоджень та відновлення теплопостачання споживачам, збільшення втрати теплоносія, економічні та репутаційні втрати.

У приладовому устаткуванні мають бути реалізовані всі найсучасніші досягнення і напрацювання, що довели свою практичну ефективність, а саме:

- в кореляційних течешукачах – високоефективні методи отримання точних оцінок ВКФ вібросигналів, методи вторинної обробки ВКФ з метою отримання достовірної інформації про координати витоків в умовах багатохвильового поширення і інтерференції;

- в термоакустичних течешукачах – спеціалізований набір датчиків для контактного вимірювання рівня віброакустичного шуму (поточного і мінімального) на поверхнях різного типу (в т.ч. на металевому трубопроводі, на твердому покритті і пухкому ґрунті, на піску і при наявності снігового покриву) і швидкодіючого (не більше 1 сек) безконтактного вимірювання температури ґрунту з високою розподільчою здатністю (не менше 0,03°С), системи автоматичного регулювання підсиленням та "захисту слуху" оператора;

- діагностичні зонди для параметричного обстеження непрохідних каналів повинні забезпечувати отримання відеозображення ознак витoku у каналах прокладання, зазирати за кут повороту теплотраси неподалік від теплової камери, проводити вимірювання акустичного шуму і безконтактні вимірювання температури на максимальній дистанції не менш 6 м.

Прилади повинні мати зручну у використанні, максимальну ступінь автоматизації – автоматичного вмикання приладу при під'єднанні до нього датчика, автоматичне розпізнавання типу під'єданого датчика та відповідний, автоматичний вибір режиму роботи приладу. Повинні бути виключені рутинні дії оператора з ручного вибору чутливості, шкали вимірювань у конкретних умовах і т.і. У складних випадках застосування приладу практично всі приладові параметри його функціонування, що задаються оператором, повинні мати добре продуману опцію задавання "за замовчуванням".

Застосування комплексної методики визначення координат витоків підземних трубопроводів

Методика комплексного використання кореляційних, акустичних і термоакустичних течешукачів, діагностичного зонда і допоміжного обладнання при пошуку витоків підземних трубопроводів теплових мереж розглянута авторами в ряді робіт. Виявлення координат витоків підземних трубопроводів здійснюється за непрямыми ознаками – по шумам витоків, температурним аномаліям, що реєструється в місцях витoku та скупчення теплоносія. Тому для мінімізації ймовірності помилок, підвищення точності визначення місць розташування пошкоджень, необхідно застосовувати комплексний підхід.

– Шляхом порівняння рівнів вібрації в декількох ТК безпосередньо на подавальному і на зворотному трубопроводах визначається ділянка трубопроводу з витокком. Вимірювання здійснюються за допомогою термоакустичного течешукача, до якого підключається вібрдатчик з магнітним утримувачем.

– За допомогою трасошукача проводиться визначення точної траєкторії прокладки пошкодженої ділянки теплової мережі. Потім мірним колесом (курвіметром) вимірюється довжина цієї ділянки.

– На кінцях ділянки трубопроводу з витокком встановлюються вібрдатчики кореляційного течешукача. Здійснюється запис та обробка вібросигналів. Застосовується методика просторової фільтрації вібросигналів шляхом повторних вимірювань в декількох точках всередині ТК: зі зміщенням датчиків уздовж вісі трубопроводу на відстань від 0,2 м до 3 м і зі зміщенням по колу на кут $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 135^\circ$, 180° трубопроводу. Обчислення координати витoku здійснюється з урахуванням багатохвильового поширення вібросигналів і інтерференції.

– Для підтвердження результатів чи прискорення пошуку застосовується термоакустичний течешукач зі штатним вібрдатчиком, за допомогою якого обстежується ділянка поверхні над розрахунковим положенням витoku. Завдання – виявити пляму підвищеного рівня шуму на поверхні ґрунту над витокком.

– Для додаткового підтвердження результатів пошуку застосовується термоакустичний течешукач з датчиком теплового випромінювання, за

допомогою якого обстежується ділянка поверхні над розрахунковим положенням витоку. Завдання – виявити пляму підвищеної температури ґрунту над витоком чи просторову границю, з якої починається область підвищеної температури ґрунту у напрямку залитої теплової камери.

– При виявленні розбіжностей в показаннях різних методів визначення координат витоків слід уточнити довжину трубопроводу та швидкість поширення хвилі гідравлічного удару шляхом проведення вимірювань методом послідовної трехточки з установкою вібродатчиків в наступних по довжині трубопроводу теплокамерах.

– Якщо виток знаходиться десь поблизу теплової камери, слід застосовувати діагностичний зонд для параметричного обстеження каналів теплотрас.

Трубопроводи теплопостачання, як правило, мають достатньо високий надлишковий тиск теплоносія, тому акустичний шум витоку майже завжди є наявним. Тому завдання персоналу полягає у виявленні витоку та, по можливості, у підтвердженні його координат зазначеними способами.

Для локального підвищення тиску і відповідно збільшення потужності акустичного шуму витоку, на ДДТ можуть застосовуватися компресори, що підключаються до теплової мережі за допомогою спеціальних перехідників.

Дистанційна оцінка корозійного зносу підземних трубопроводів за допомогою низькочастотних віброакустичних методів діагностування

Кардинально переломити негативну тенденцію катастрофічного зростання аварійності міських підземних трубопроводів пропонується за допомогою впровадження розроблених кореляційних параметричних низькочастотних віброакустичних методів [4] і відповідного приладового обладнання [5] оцінки стану металу стінок трубопроводів, які забезпечують отримання необхідних показників дистанційності і достовірності.

Шурфування і вимірювання залишкової товщини стінки у найбільш пошкоджених місцях трубопроводів

Відповідно до нормативних вимог [6, 7] юридичне обґрунтування оцінки стану і продовження ресурсу здійснюється на підставі контролю металу трубопроводів в шурфах, наприклад, за допомогою ультразвукового товщиноміра. При цьому шурфування повинні проводитися в першу чергу:

– в місцях з несприятливими гідрогеологічними умовами (затоплення прокладок ґрунтовими, зливовими і іншими водами, підвищена корозійна активність ґрунтів);

– на ділянках, розташованих поблизу відкритих водостоків, ліній каналізації і водопроводу що перетинають їх;

– в місцях з підвищеними тепловими втратами (наявність талих місць уздовж траси теплопроводу в зимовий час);

– поблизу місць корозійних пошкоджень трубопроводів.

Нормативні документи [6, 7] не регламентують чітко порядок вибору місць шурфовок, немає вимог інструментального обґрунтування їх вибору. У

зв'язку з цим, на практиці це положення носить ущербний характер, тому що кількість шурфів обмежена з економічних і практичних міркувань, шурфи можуть не збігтися з місцями найбільшого корозійного стоншення стінок трубопроводів.

Пропонується технічну суворість і достовірність висновків експертизи за нормативними документами [6, 7] доповнити інструментальним обґрунтуванням місць шурфовок.

Дистанційна інструментальна оцінка стану металу стінок підземних трубопроводів

Для оцінки стану металу стінок підземних трубопроводів пропонується використовувати систему РАСТР-1М [5], яка розгортається послідовно уздовж теплотраси. Спочатку уточнюється спектр швидкостей домінуючих за потужністю хвиль вібро сигналів, потім визначаються конкретні місця і оцінка ступеня корозійного стоншення [4]. Саме в цих місцях теплотраси рекомендується проводити контрольні шурфування для вимірювання залишкової товщини стінки трубопроводу.

При виборі ділянок для шурфовки доцільно також застосовувати і інтегральні показники:

- наявність наднормативного загасання вібро сигналів;
- відмінність фактичної швидкості гідравлічного удару від табличної.

Формування обґрунтованого висновку про стан та умови подальшої експлуатації підземних трубопроводів тепломережі

Масштабне впровадження практики дистанційної оцінки ступеня корозійного стоншення стінок підземних трубопроводів з контрольними шурфовками дозволяє об'єктивно оцінити можливість і умови подальшої експлуатації протяжних ділянок трубопроводів:

- коригувати допустимі робочі режими (коригування схеми теплопостачання, тиску, температури);
- планувати послідовність перекладань ділянок трубопроводів, виключити перекладку ділянок, які могли б працювати ще багато років;
- перейти до виконання попереджувального точкового ремонту в місцях "критичного стоншення" до утворення просочувань та небезпечних поривів.

Збільшення обсягу інструментальної дистанційної віброакустичної діагностики підземних тепломереж та прицільних (за даними діагностування) планово-попереджувальних робіт в літній період має суттєво знизити тяжкість аварійно-відновлювальних робіт в опалювальний сезон з усунення масштабних наслідків від поривів теплотрас.

В даний час в літній період ремонтні служби РТМ здебільшого зайняті усуненням поривів, що виникають в ході весняних гідравлічних випробувань теплових мереж. Багато фахівців схиляються до думки, що проведення гідравлічних випробувань зношених трубопроводів призводять до різкого зменшення їхнього ресурсу.

Метрологічна підтримка

Для вирішення завдання метрологічного забезпечення засобів діагностування підземних трубопроводів з урахуванням вимог та завдань ДП “Укрметртестстандарт” виконано розробку спеціального метрологічного обладнання, у т.ч. віброкалібрувальні установки АВКУ, АПК для акустичних вимірювань АКУСТИК, які дозволяють автоматизувати трудомісткі процеси перевірки метрологічних характеристик датчиків і пристроїв віброакустичної діагностики при суттєвому зменшенні впливу «людського» фактора на результати вимірювань.

Висновки

Запропоновано комплекс організаційно-технічних заходів, які призвані забезпечити підвищення якісних показників експлуатації зношених підземних трубопроводів тепlopостачання. Пропозиції в основі своїй базуються на використанні переваг розроблених у ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України кореляційних параметричних діагностичних методів та обладнання.

1. *Владимирский А. А., Владимирский И. А., Криворучко И. П., Савчук Н. П.* Разработка модернизированного корреляционного теческателья К-10.5М2 // Моделювання та інформаційні технології Зб. наук. пр. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – Вип. 79. – К.: 2017. – С.68-70.
2. *Владимирский А. А., Владимирский И. А., Дрозденко А. И.* Модернизированный термоакустический теческатель А-10Т2 // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2014. – Вип. 70. – С.93-97.
3. *Владимирский А.А., Владимирский И.А., Криворучко И.П., Криворот А.А., Савчук Н.П.* Разработка диагностического зонда ДЗ-1 // Моделювання та інформаційні технології Зб. наук. пр. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – Вип. 59. – К.: 2011. – С.20-25.
4. *Владимирський О.А.* Параметричні методи діагностування підземних трубопроводів з урахуванням багатохвильового поширення інформаційних сигналів. Електронне моделювання. 2019. 41 (1). С.3-17.
5. *Владимирский А.А., Владимирский И.А., Криворучко И.П., Савчук Н.П.* Разработка модернизированной системы низкочастотного диагностирования состояния трубопроводов РАСТР-1М // Моделювання та інформаційні технології Зб. наук. пр. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – Вип. 78. – К.: 2017. – С.40-45.
6. Методические указания по проведению шурфовок в тепловых сетях. МУ 34-70-149-86. Министерство энергетики и электрификации СССР. М.: СПО Союзтехэнерго, 1986. 10 с. [Електронний ресурс]. URL: <http://law.rufox.ru/view/14/1200044698.htm>. (Дата звернення 5.11.2019).
7. Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж. / Міністерство палива та енергетики України. Київ, 2007.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3860724>

Поступила 23.09.2019р.