

І.Р. ВАЩИШАК, аспірантка, ІФНТУНГ, Івано-Франківськ

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДЗЕМНИХ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ ЇХ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Описано процес збудження та поширення акустичних коливань в підземних теплових мережах безканальної прокладки з трубопроводами в пінополіуретановій ізоляції від металеві поверхні трубопроводу до поверхні ґрунту. Розглянуто нові інформативні параметри акустичного поля, які характеризують технічний стан підземної теплової мережі. Проаналізовано вплив виду дефекту трубопроводу і теплової та гідроізоляцій теплової мережі на зміну інформативних параметрів.

Описан процесс возбуждения и распространения акустических колебаний в подземных тепловых сетях бесканальной прокладки с трубопроводами в пенополиуретановой изоляции от металлической поверхности трубопровода до поверхности почвы. Рассмотрены новые информативные параметры звукового поля, которые характеризуют техническое состояние подземной тепловой сети. Проанализировано влияние вида дефекта трубопровода и тепловой и гидроизоляции тепловой сети на изменение информативных параметров.

The process of excitation of acoustic vibrations in underground heating networks with channel-free laying pipelines in pinopolyuretonovy isolated from the metal surface of the pipeline to the ground. Considers new informative parameters of acoustic fields that characterize the condition of underground heat network. The influence of the type of defect and pipe thermal and hydro insulations thermal network to change the informative parameters.

Останнім часом в Україні для прокладання підземних теплових мереж широко застосовуються трубопроводи з пінополіуретановою ізоляцією (ППУ) в поліетиленовій оболонці. Застосування цих трубопроводів для прокладання теплових мереж безканальним способом повинно забезпечити значне збільшення робочого ресурсу теплових мереж – до 30 років, зменшити кількість пошкоджень в десятки разів та різко знизити теплові втрати – до 2-3%, що зумовить відповідні економічні вигоди [1,2].

Однак, практичний досвід показує, що вже через 3-5 років експлуатації тепломереж з трубами в ППУ-ізоляції мають місце аварійні ситуації, пов'язані з розгерметизацією трубопроводів і витіканням теплоносія. Причинами наскрізного пошкодження металу труб є: неякісне виконання зварних швів; локальна виразкова корозія внутрішніх поверхонь через дефекти металу і порушення водно-хімічного режиму; порушення герметичності муфтових з'єднань і кінцевих заглушок ізоляції з попаданням корозійно-агресивної вологи на зовнішню поверхню труб; попадання вологи в ППУ-ізоляцію при проведенні монтажних робіт; слабка адгезія і відшаровування пінополіуретану від поверхні труб з утворенням порожнин, де може накопичуватися волога, механічне пошкодження поліетиленової гідроізоляції, руйнування елементів операційно-дистанційного контролю [1-3].

Вітчизняний та закордонний досвід експлуатації труб з ППУ-ізоляцією показує, що трубопроводи теплових мереж, які діють без систем сигналізації є потенційно небезпечними через можливість виникнення неконтрольованих витоків теплоносія в ґрунт, оскільки до теперішнього часу практично не існує методів і засобів для визначення місця витoku труби в ППУ-ізоляції, а місцеположення наскрізного дефекту металевої труби в більшості випадків не відповідає місцю виходу теплоносія з-під поліетиленової гідроізоляції.

Найбільш поширений при контролі теплових мереж каналної прокладки метод реєстрації акустичного шуму струменя теплоносія через дефект трубопроводу, для мереж безканалної прокладки з трубопроводами в ППУ-ізоляції застосувати також практично неможливо. Це пояснюється тим, що потужність акустичного випромінювання залежить від швидкості витікання теплоносія через дефект, яка, у свою чергу, залежить від різниці тиску в трубі і затрубному просторі, куди відбувається витік. Оскільки в трубопроводі з ППУ-ізоляцією затрубний простір заповнений тепловою ізоляцією, яка зовні ущільнена шаром поліетиленової гідралічної ізоляції, то вода з трубопроводу не попадає в ґрунт, а поступово просочується в затрубний простір, зволожуючи теплову ізоляцію і практично не створюючи акустичного шуму [4]. Коливання стінок трубопроводу, створені за рахунок пульсації рідини в трубах не мають значної потужності, оскільки вони практично повністю поглинаються в шарі теплової ізоляції, і на поверхні ґрунту не реєструються.

Усе вищенаведене дає змогу стверджувати, що питання контролю технічного стану підземних теплових мереж безканалної прокладки з трубопроводами в ППУ-ізоляції на даний час є доволі актуальним.

Для вирішення цього питання пропонується застосувати удосконалений акустичний метод контролю, суть якого полягає в примусовому збудженні генератором акустичних коливань у металевому трубопроводі такої потужності, що дасть змогу коливанням поширитись через шари ізоляцій трубопроводу та засипок до поверхні ґрунту і зареєструвати їх на поверхні ґрунту приймачем (мікрофоном).

Збуджені акустичні коливання, поширюючись від металевого трубопроводу до поверхні ґрунту, змінюватимуть свої характеристики в залежності від наявності того чи іншого виду дефекту теплових мереж.

Щоб визначити параметри, які несуть інформацію про технічний стан підземного трубопроводу з ППУ-ізоляцією, змодельємо процес поширення акустичних коливань від одиничного трубопроводу за схемою: генератор – поверхня металевого трубопроводу – теплова ізоляція - гідроізоляція – піщана засипка - ґрунтова засипка – ґрунт – приймач.

Генерування акустичної хвилі в металевому трубопроводі відбувається наступним чином. Генератор подає в метал трубопроводу сигнал у вигляді акустичного збудження металу труби з інтенсивністю J (Вт/м²). При цьому трубопровід можна представити як акустичний випромінювач, що генерує циліндричну акустичну хвилю з такими характеристиками [5]:

- потенціалом швидкості:

$$\phi = \frac{A_0}{\sqrt{r}} \cdot e^{j(\omega t - k \cdot r)}, \quad (1)$$

де $\frac{A_0}{\sqrt{r}}$ – амплітуда, ($\text{м}^2/\text{с}$); r – радіус циліндричної хвилі, м; $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ – хвильове число, $1/\text{м}$; C – швидкість звуку, $\text{м}/\text{с}$; ω – циклічна частота, Гц ; t – час, с;

- коливальною швидкістю:

$$v_r = \frac{A_0}{\sqrt{r}} \cdot \left(j \cdot k - \frac{1}{2 \cdot r} \right) \cdot e^{j(\omega t - k \cdot r)}; \quad (2)$$

- акустичним тиском:

$$p = j \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot \phi, \quad (3)$$

де ρ_0 – густина середовища (металевий трубопровід), в якому поширюється акустична хвиля, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Оскільки безпосередньому вимірюванню піддається тільки дійсна частина комплексних швидкості та тиску, то в подальшому будемо розглядати зміни тільки дійсних частин цих комплексних величин.

При моделюванні процесу проходження акустичних коливань через границі розділу середовищ з різними акустичними характеристиками системи «трубопровід – ґрунт» особливе значення має врахування граничних умов. В даному випадку як граничну умову приймемо рівність коливальних швидкостей на границях розділу середовищ. Кінцевою задачею моделювання є визначення напрямку поширення та величини коливальної швидкості від металеві поверхні трубопроводу до поверхні ґрунту і величини звукового тиску на поверхні ґрунту. Моделювання здійснюватимемо відносно заданої інтенсивності акустичного збудження, яка є функцією коливальної швидкості, частоти і звукового тиску.

Інтенсивність акустичного збудження для циліндричної хвилі, згідно з [5] рівна:

$$J = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot A_0^2}{\lambda^2 \cdot r} \cdot \rho_0 \cdot c_0, \quad (4)$$

де C_0 – швидкість звуку в металевому трубопроводі, м/с; λ – довжина хвилі, м.

Підставивши у формулу (4) вирази $A_0 = v_r \cdot \sqrt{r}$ та $\lambda = \frac{c_0}{f}$, отримаємо формулу для визначення коливальної швидкості у місці акустичного збудження на металевій поверхні трубопроводу:

$$v_r = \sqrt{\frac{J \cdot c_0}{2 \cdot \pi^2 \cdot \rho_0 \cdot f^2}}, \quad (5)$$

де f – частота сигналу збудження, c^{-1} .

Безпосереднє використання теорії поширення циліндричної хвилі для опису процесу розповсюдження акустичної хвилі від підземного трубопроводу з ППУ-ізоляцією до поверхні ґрунту наштовхується на значні труднощі, оскільки акустична система «трубопровід – ґрунт» складається з багатьох середовищ з різними акустичними характеристиками. Крім того при переході акустичної хвилі через межу розділу середовищ відбуваються процеси її заломлення і відбивання, а геометричні параметри акустичної системи «трубопровід – ґрунт» задають жорсткі обмеження на використання детально опрацьованих теоретичних моделей акустики. Тому для опису процесу розповсюдження акустичної хвилі застосуємо певні спрощення [6].

Виріжемо в поперечному перерізі системи «трубопровід – ґрунт» тонкий шар Δz і розглянемо поширення циліндричної хвилі вздовж променя OB (рис.1). За початок координат приймемо вісь трубопроводу. При досить малій товщині шару Δz поширення акустичної циліндричної хвилі в малому радіусі $\frac{\Delta z}{2}$ навколо акустичного променя можна вважати як поширення плоскої хвилі з амплітудою коливальної швидкості, рівної v_r .

Оскільки система «трубопровід – ґрунт» (рис.1) симетрична відносно площини $x = 0$ достатньо розглядати поведінку акустичної хвилі в I-ому квадранті ($x \geq 0, y \geq 0$).

Основним фактором формування акустичного поля на поверхні ґрунту над трубопроводом тепломережі є поступове поглинання енергії акустичних коливань при розповсюдженні їх в різних середовищах.

В загальному випадку затухання коливальної швидкості акустичної хвилі визначається з виразу [7]:

$$v = v_0 \cdot e^{-\alpha \cdot l}, \quad (6)$$

де v_0 – початкова амплітуда коливальної швидкості, м/с; α – коефіцієнт поглинання акустичної хвилі, 1/м; l – довжина ходу акустичної хвилі в поглинаючому середовищі, м.

Коефіцієнт поглинання акустичної хвилі α залежить від теплопровідності, густини та в'язкості середовища, крізь яке хвиля проходить і знаходиться за формулою:

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2 \cdot \rho_0 \cdot c^3} \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \eta + \eta' + x \cdot \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right) \quad (7)$$

де ω - частота, Гц; ρ_0 - густина середовища, кг/м³; c - швидкість звуку в середовищі, м/с; η - коефіцієнт поперечної в'язкості, Па·с; η' - коефіцієнт об'ємної в'язкості, Па·с; x - коефіцієнт теплопровідності середовища, Вт/(м·К); c_v - питома теплоємність при постійному об'ємі, Дж/(кг·К); c_p - питома теплоємність при постійному тиску, Дж/(кг·К).

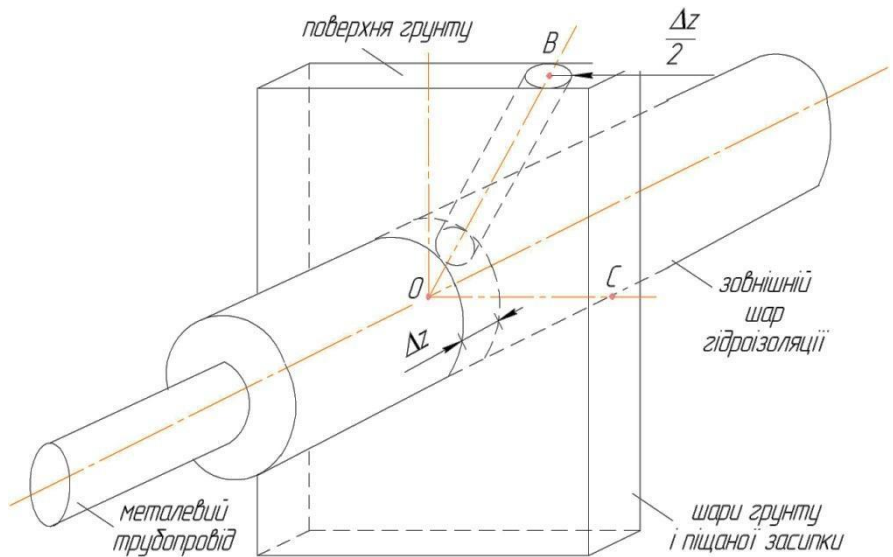


Рис. 1. Модель поширення акустичної хвилі по системі «трубопровід – ґрунт»

Оскільки для випромінювання акустичних коливань застосовується зовнішня поверхня тіла трубопроводу, по якому транспортується теплоносій, то коефіцієнт затухання коливань в металі труби на формування акустичного

поля на поверхні ґрунту матиме певний вплив [6]. Зміна коливальної швидкості акустичної хвилі вздовж ділянки трубопроводу визначається за формулою:

$$v_T = v_r \cdot e^{-\alpha_T \cdot l_T}, \quad (8)$$

де v_r – початкова амплітуда коливальної швидкості (амплітуда збудження), м/с; α_T – коефіцієнт поглинання акустичної хвилі в металі труби, 1/м; l_T – довжина ділянки трубопроводу, м.

В цілому система «трубопровід – ґрунт» (рис.1) складається з кількох елементів, які мають різні акустичні характеристики. Цими елементами є:

- 1) матеріал трубопроводу, по якому подається теплоносій (сталь);
- 2) теплова ізоляція трубопроводу (спінений пінополіуретан);
- 3) гідроізоляція трубопроводу (поліетилен);
- 4) піщана засипка трубопроводу (пісок);
- 5) ґрунтова засипка трубопроводу;
- 6) нерозпушений в процесі прокладання ґрунт.

Розглянемо зміну амплітуди коливальної швидкості вздовж променя OB (рис.2), напрямком якого задається кутом φ . В тілі трубопроводу акустичні коливання поширюються строго по радіусу труби і не залежать від напрямку. Акустична хвиля (рис.2), поширюючись від зовнішньої поверхні металевої труби, спочатку проходить шар теплової пінополіуретанової ізоляції (ПІ) з товщиною $h_{ПІ}$ і коефіцієнтом поглинання $\alpha_{ПІ}$. Амплітуда коливальної швидкості $v_{ПІ}$ в цьому випадку буде рівна:

$$v_{ПІ} = v_T \cdot e^{-\alpha_{ПІ} \cdot h_{ПІ}}. \quad (9)$$

На границі ПІ та поліетиленової гідроізоляції (ГІ) у точці O' (рис. 2) відбудеться часткове проходження і часткове відбивання акустичної хвилі, оскільки ПІ та ГІ мають різні акустичні імпеданси. При нормальному падінні акустичної хвилі на границю розділу ПІ та ГІ коефіцієнт проходження по коливальній швидкості $T_{v_{ПІГІ}}$ знаходиться з виразу [7]:

$$T_{v_{ПІГІ}} = \frac{2 \cdot Z_{ПІ}}{Z_{ПІ} + Z_{ГІ}} = \frac{2 \cdot \rho_{ПІ} \cdot c_{ПІ}}{\rho_{ПІ} \cdot c_{ПІ} + \rho_{ГІ} \cdot c_{ГІ}}, \quad (10)$$

де $Z_{ПІ}$ - акустичний опір ПІ, Па·с/м; $Z_{ГІ}$ - акустичний опір ГІ, Па·с/м; $\rho_{ПІ}$ - густина ПІ, кг/м³; $\rho_{ГІ}$ - густина ГІ, кг/м³; $c_{ПІ}$ – швидкість звуку в ПІ, м/с; $c_{ГІ}$ – швидкість звуку в ГІ, м/с.

Амплітуда коливальної швидкості пройшовшої через границю розділу ПІ та ПІ акустичної хвилі $v_{\text{ПІ/ПІ}}$ розраховується з формули:

$$v_{\text{ПІ/ПІ}} = v_{\text{ПІ}} \cdot T_{v_{\text{ПІ/ПІ}}} = v_{\text{ПІ}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_{\text{ПІ}} \cdot c_{\text{ПІ}}}{\rho_{\text{ПІ}} \cdot c_{\text{ПІ}} + \rho_{\text{ПІ}} \cdot c_{\text{ПІ}}} . \quad (11)$$

Далі акустична хвиля проходить шар ПІ з товщиною $h_{\text{ПІ}}$ і коефіцієнтом поглинання $\alpha_{\text{ПІ}}$. Амплітуда коливальної швидкості $v_{\text{ПІ}}$ буде рівна:

$$v_{\text{ПІ}} = v_{\text{ПІ/ПІ}} \cdot e^{-\alpha_{\text{ПІ}} \cdot h_{\text{ПІ}}} . \quad (12)$$

На границі ПІ та піщаної засипки (ПЗ) у точці A (рис. 2) відбудеться часткове проходження та відбивання акустичної хвилі аналогічно як і при перетині границі ПІ та ПІ. Шляхом переіндексації змінних отримаємо вираз для визначення амплітуди коливальної швидкості пройшовшої хвилі $v_{\text{ПІ/ПЗ}}$:

$$v_{\text{ПІ/ПЗ}} = v_{\text{ПІ}} \cdot T_{v_{\text{ПІ/ПЗ}}} = v_{\text{ПІ}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_{\text{ПІ}} \cdot c_{\text{ПІ}}}{\rho_{\text{ПІ}} \cdot c_{\text{ПІ}} + \rho_{\text{ПЗ}} \cdot c_{\text{ПЗ}}} , \quad (13)$$

де $\rho_{\text{ПЗ}}$ - густина ПЗ, кг/м³; $c_{\text{ПЗ}}$ – швидкість звуку в ПЗ, м/с.

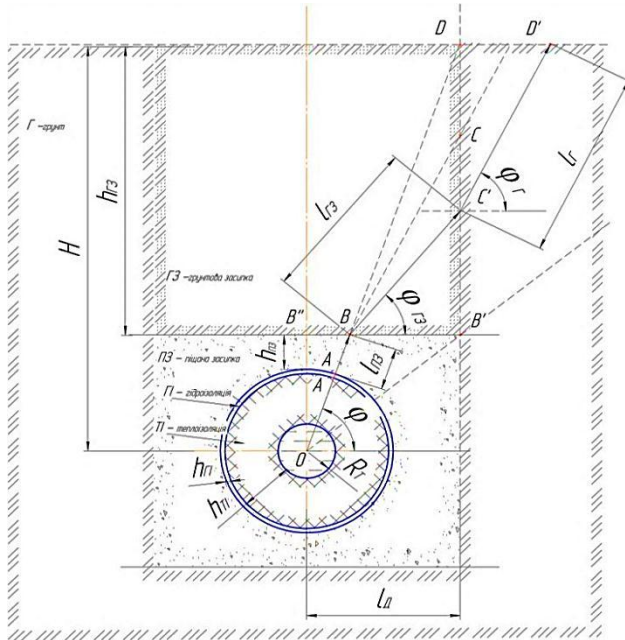


Рис. 2. Розрахункова модель ходу акустичного променя

В шарі ПЗ акустична хвиля так само буде поширюватись по радіусу труби, однак товщина шару піщаної засипки вже буде залежати від кута напрямку поширення променя φ . Таким чином акустична хвиля буде поширюватись в одному з трьох напрямків. У першому напрямку акустичний промінь буде перетинати горизонтальну границю піщаної і ґрунтової (ГЗ) засипок, в другому напрямку – границю ПЗ, ГЗ і нерозпушеного ґрунту (Г), у третьому напрямку - границю ПЗ і Г.

Розглянемо випадок, коли акустичний промінь перетинатиме найбільшу кількість меж розділу середовищ (границі ПЗ та ГЗ, ГЗ та Г). Довжина ходу акустичної хвилі в ПЗ $l_{ПЗ}$ (відрізок AB на рис.2) знаходиться з властивостей прямокутного трикутника OBV'' і дорівнює:

$$l_{ПЗ} = \frac{(R_T + h_{П1} + h_{Г1}) \cdot (1 - \sin \varphi) + h_{ПЗ}}{\sin \varphi}, \quad (14)$$

де R_T – діаметр металевої труби, м; $h_{ПЗ}$ – товщина піщаної засипки, м.

Тоді амплітуда коливальної швидкості в ПЗ $v_{ПЗ}$, враховуючи коефіцієнт поглинання $\alpha_{ПЗ}$ буде рівною:

$$v_{ПЗ} = v_{Г/ПЗ} \cdot e^{-\alpha_{ПЗ} \cdot l_{ПЗ}}. \quad (15)$$

Розглянемо поведінку акустичної хвилі на межі ПЗ та ГЗ (точка B на рис. 2). Оскільки ПЗ і ГЗ мають різні акустичні властивості, то на границі їх розділу відбувається заломлення хвилі зі зміною кута поширення пройшовшої хвилі в ГЗ.

Кут заломлення акустичної хвилі можна визначити з загального закону Снеліуса (рис.3):

$$\frac{c_{ПЗ}}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} = \frac{c_{ГЗ}}{\sin(\theta_{ГЗ})}, \quad (16)$$

звідки

$$\cos \theta_{ГЗ} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{ГЗ}} = \sqrt{1 - \left(\frac{c_{ГЗ}}{c_{ПЗ}} \cdot \cos \varphi\right)^2}, \quad (17)$$

де $c_{ГЗ}$ – швидкість звуку в ГЗ, м/с.

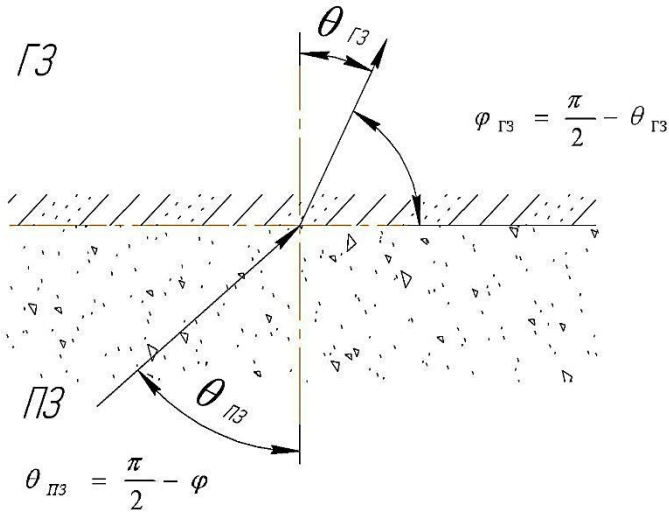


Рис. 3. Заломлення акустичного променя на межі піщаної та ґрунтової засипок

Слід зауважити, що при заломленні акустичної хвилі виникають граничні кути, при яких хвиля вже не перейде з ПЗ в ГЗ, а повернеться в ПЗ. Оскільки акустична хвиля збуджується в діапазоні $(0 \div 2\pi)$, тому граничні кути для кожного конкретного акустичного променя, що падає на границю розділу двох середовищ, матимуть різні значення [7]. На поверхні реструктуруватиметься тільки хвилі, які пройдуть через границю розділу двох середовищ.

При падінні акустичної хвилі на границю ПЗ та ГЗ під кутом $\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)$ коефіцієнт проходження по коливальній швидкості $T_{v_{ПЗ/ГЗ}}$ знаходиться з виразу [7]:

$$\begin{aligned}
 T_{v_{ПЗ/ГЗ}} &= \frac{2 \cdot Z_{ГЗ} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{Z_{ПЗ} \cdot \cos(\theta_{ГЗ}) + Z_{ГЗ} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} = \\
 &= \frac{2 \cdot \rho_{ГЗ} \cdot c_{ГЗ} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{\rho_{ПЗ} \cdot c_{ПЗ} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_{ГЗ}}{c_{ПЗ}} \cdot \cos \varphi\right)^2} + \rho_{ГЗ} \cdot c_{ГЗ} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} , \quad (18)
 \end{aligned}$$

де $Z_{ПЗ}$ – акустичний опір ПЗ, Па·с/м; $Z_{ГЗ}$ – акустичний опір ГЗ, Па·с/м; $\rho_{ГЗ}$ – густина ГЗ, кг/м³.

Амплітуда коливальної швидкості пройшовшої через границю розділу ПЗ. ГЗ акустичної хвилі $v_{ПЗ/ГЗ}$ розраховується з виразу:

$$v_{ПЗ/ГЗ} = v_{ПЗ} \cdot T_{v_{ПЗ/ГЗ}} = v_{ПЗ} \cdot \frac{2 \cdot \rho_{ГЗ} \cdot c_{ГЗ} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{\rho_{ПЗ} \cdot c_{ПЗ} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_{ГЗ}}{c_{ПЗ}} \cdot \cos\varphi\right)^2} + \rho_{ГЗ} \cdot c_{ГЗ} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}. \quad (19)$$

Внаслідок явища заломлення подальший напрямок поширення акустичних хвиль вже буде відрізнятись від променя OB (кут напрямку φ). Визначимо новий кут напрямку поширення хвилі $\varphi_{ГЗ}$. З виразу (16) та рис.3 видно, що він дорівнює:

$$\varphi_{ГЗ} = \arcsin\left(\frac{c_{ГЗ}}{c_{ПЗ}} \cdot \cos\varphi\right). \quad (20)$$

Визначимо довжину ходу акустичного променя в ГЗ $l_{ГЗ}$ (відрізок BC' на рис.2):

$$l_{ГЗ} = \frac{l_D - ctg\varphi \cdot (h_{ПЗ} + R_T + h_{Т1} + h_{Г1})}{\cos\varphi_{ГЗ}}, \quad (21)$$

де l_D – відстань від осі трубопроводу до межі ПЗ і Г, м.

Тоді амплітуда коливальної швидкості $v_{ГЗ}$, враховуючи коефіцієнт поглинання $\alpha_{ГЗ}$ буде рівною:

$$v_{ГЗ} = v_{ПЗ/ГЗ} \cdot e^{-\alpha_{ГЗ} \cdot l_{ГЗ}}. \quad (22)$$

На границі ГЗ та Г у точці C' (рис. 2) відбудеться часткове проходження та відбивання хвилі аналогічно як при перетині границі ПЗ та ГЗ. Провівши переіндексації змінних, отримаємо вирази для кута заломлення хвилі, коефіцієнта проходження по коливальній швидкості $T_{v_{ГЗ/Г}}$, амплітуди коливальної швидкості пройшовшої хвилі $v_{ГЗ/Г}$, нового кута напрямку поширення хвилі $\varphi_{Г}$:

$$\frac{c_{ГЗ}}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{ГЗ}\right)} = \frac{c_{Г}}{\sin(\theta_{Г})}, \quad (23)$$

звідки

$$\cos \theta_{Г} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Г}} = \sqrt{1 - \left(\frac{c_{Г}}{c_{ГЗ}} \cdot \cos \varphi_{ГЗ}\right)^2}, \quad (24)$$

де $c_{Г}$ – швидкість звуку в нерозпушеному ґрунті, м/с.

Значення коливальної швидкості $T_{v_{ГЗГ}}$ можна знайти з формули:

$$\begin{aligned} T_{v_{ГЗГ}} &= \frac{2 \cdot Z_{Г} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{ГЗ}\right)}{Z_{ГЗ} \cdot \cos(\theta_{Г}) + Z_{Г} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{ГЗ}\right)} = \\ &= \frac{2 \cdot \rho_{Г} \cdot c_{Г} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{ГЗ}\right)}{\rho_{ГЗ} \cdot c_{ГЗ} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_{Г}}{c_{ГЗ}} \cdot \cos \varphi_{ГЗ}\right)^2} + \rho_{Г} \cdot c_{Г} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{ГЗ}\right)} \end{aligned}, \quad (25)$$

де $Z_{Г}$ - акустичний опір нерозпушеного ґрунту, Па·с/м; $\rho_{Г}$ - густина нерозпушеного ґрунту, кг/м³.

$$v_{ГЗГ} = v_{ГЗ} \cdot T_{v_{ГЗГ}} = v_{ГЗ} \cdot \frac{2 \cdot \rho_{Г} \cdot c_{Г} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{ГЗ}\right)}{\rho_{ГЗ} \cdot c_{ГЗ} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_{Г}}{c_{ГЗ}} \cdot \cos \varphi_{ГЗ}\right)^2} + \rho_{Г} \cdot c_{Г} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{ГЗ}\right)}, \quad (26)$$

$$\varphi_{Г} = \arcsin\left(\frac{c_{Г}}{c_{ГЗ}} \cdot \cos \varphi_{ГЗ}\right). \quad (27)$$

Хід хвилі в нерозпушеному ґрунті $l_{Г}$ (відрізок $C'D'$ на рис.2) визначається з властивостей трикутників $BB'C'$ та $C'DD'$ і знаходиться з виразу:

$$l_{\Gamma} = \frac{h_{\Gamma 3} - l_{\Gamma 3} \cdot \sin \varphi_{\Gamma 3}}{\sin \varphi_{\Gamma}}, \quad (28)$$

де $h_{\Gamma 3}$ – товщина ґрунтової засипки, м.

Амплітуда коливальної швидкості v_{Γ} , враховуючи коефіцієнт поглинання α_{Γ} розрахується за формулою:

$$v_{\Gamma} = v_{\Gamma 3 \Gamma} \cdot e^{-\alpha_{\Gamma} l_{\Gamma}}. \quad (29)$$

Акустична хвиля приходить до поверхні ґрунту під деяким кутом в кожній точці поверхні над трубопроводом. Тому в атмосферу перейде тільки певна її частина $v_{\Gamma \Pi}$ (точка D' на рис. 2), яка знаходиться з виразу:

$$v_{\Gamma \Pi} = v_{\Gamma} \cdot \frac{2 \cdot \rho_{\Pi} \cdot c_{\Pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\Gamma}\right)}{\rho_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_{\Pi}}{c_{\Gamma}} \cdot \cos \varphi_{\Gamma}\right)^2} + \rho_{\Pi} \cdot c_{\Pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\Gamma}\right)}, \quad (30)$$

де ρ_{Π} - густина повітря, кг/м³; c_{Π} – швидкість звуку в повітрі, м/с.

За отриманим значенням коливальної швидкості $v_{\Gamma \Pi}$ можна розрахувати інтенсивність J_{Π} акустичної хвилі, яка перейде з поверхні ґрунту у повітря:

$$J_{\Pi} = \frac{v_{\Gamma \Pi}^2 \cdot \rho_{\Pi} \cdot c_{\Pi}}{2}. \quad (31)$$

Надлишковий акустичний (звуковий) тиск в повітрі над поверхнею ґрунту в точці вимірювання розраховується з виразу:

$$p_{\Pi} = \sqrt{2 \cdot J_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi} \cdot c_{\Pi}} = v_{\Gamma \Pi} \cdot \rho_{\Pi} \cdot c_{\Pi}. \quad (32)$$

Оскільки поверхня вимірювального мікрофона має певну площу, а моделювання проводилось для тонкого акустичного променя, то для визначення звукового тиску, який буде виміряний мікрофоном безпосередньо потрібно взяти інтеграл по площі мікрофона $S_{\text{м}}$:

$$\int_0^{S_M} p_{II} \cdot ds. \quad (33)$$

На практиці необхідно розрахувати значення інтенсивності J , з якою необхідно збудити акустичну хвилю в металевому трубопроводі для того, щоб вона змогла пройти крізь всі шари і була зафіксована на поверхні ґрунту мікрофоном в зоні його максимальної чутливості. Значення J залежатиме від геометричних параметрів трубопроводу тепломережі (діаметр, товщини ізоляцій, глини залягання, видів засипок, тощо), тому в кожному конкретному випадку буде іншим.

Інформація про стан підземного трубопроводу (у вигляді виміряного в деякій точці над трубопроводом акустичного тиску) може бути отримана шляхом порівняння значення акустичного (звукового) тиску в суміжних точках вимірювання вздовж та поперек осі пролягання трубопроводу.

Інформативними параметрами, які характеризують вид пошкодження теплової мережі, є: коефіцієнт затухання α ; градієнт температури в шарі, від величини якого залежить коефіцієнт теплопровідності; густина середовища та надлишковий акустичний тиск на частотах, нижчих за 500 Гц. Взаємозв'язок між цими параметрами та видами дефектів трубопроводів тепломережі наведено в таблиці.

Таблиця

Характер зміни інформативних параметрів в залежності від виду дефекту теплової мережі

Види дефектів	Інформативні параметри			
	Коефіцієнт затухання	Густина середовища	Градієнт температури	Надлишковий акустичний тиск
Свищ зі зволоженням теплоізоляції	Зменшується	Збільшується	Збільшується	-
Пошкодження теплової ізоляції (без зволоження)	Зменшується	Зменшується	Зменшується	-
Пошкодження гідроізоляції	Зменшується	Різко зменшується	Збільшується	-
Розрив металу з пошкодженням теплової та гідроізоляцій	Різко зменшується	Збільшується	Збільшується	Збільшується

Зміна коефіцієнта затухання α та теплопровідності за рахунок дефектів трубопроводу буде набагато більшою, ніж їх зміна за рахунок неоднорідності ґрунтової та піщаної засипок.

З вищенаведеного випливає, що визначення характеристик акустичного поля на поверхні ґрунту від працюючого підземного трубопроводу з пінополіуретановою ізоляцією є досить складним завданням. Це пояснюється як геометричними характеристиками об'єкта, так і фізичними властивостями окремих його частин.

Для підвищення достовірності результатів контролю технічного стану підземних теплових мереж удосконаленим акустичним методом додатково застосовано електромагнітний вид контролю. Це дозволило набагато точніше визначати вісь пролягання та глибину залягання трубопроводу, а також з вищою точністю визначати місце його дефекту. Результати проведених досліджень дали змогу створити інформаційно-вимірвальну систему для контролю підземних теплових мереж з трубопроводами в ППУ-ізоляції, принцип дії якої базується на удосконаленому акустичному методі з додатковим застосуванням електромагнітного та теплового методів контролю.

В даний час здійснюється перевірка адекватності розробленої моделі поширення акустичних коливань на установці для дослідження підземних теплових мереж, описаних в [9].

Список літератури: 1. *Хворостов И. В.* К вопросу о надежности тепловых сетей с трубами в пенополиуретановой изоляции / *И. В. Хворостов* // *Новости теплоснабжения.* – 2000. - № 01. 2. *Самойлов Е. В.* Достоверность акустической диагностики трубопроводов тепловых сетей / *Е.В. Самойлов* // *Новости теплоснабжения.* – 2005. – № 2. – С. 47-52. 3. *Поливанов В. И.* Система контроля качества тепловых сетей / *В. И. Поливанов, Г. Х. Умеркин* // *Энергоназор и энергобезопасность.* – 2008. - №2. 4. *Самойлов Е. В.* Эффективность применения корреляционных теческательей для определения мест утечек из трубопроводов теплоснабжения / *Е.В. Самойлов, Ю.И. Тужилкин* // *Новости теплоснабжения.* – 2001. - № 7. – С. 24 – 27. 5. *Лепендин Л.Ф.* Акустика: Учеб. пособие для вузов / *Л.Ф. Лепендин.* - М.: Высш. шк., 1978. - 448 с. 6. *Борисов Л.П.* Звукоизоляция в машиностроении / *Л.П. Борисов, Д.Р. Гужас.* - М.: Машиностроение, 1990. – 256 с. 7. *Соловьянова И.П.* Теория волновых процессов. Акустические волны / *И.П. Соловьянова, С.Н. Шабунин.* - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ, 2004. – 142 с. 8. *Исакович М.А.* Общая акустика: Учеб. пособие / *М.А. Исакович.* - М.: Наука, 1973. - 496 с. 9. *Ващишак І.Р.* Розробка установок для дослідження підземних двотрубних теплових мереж з імітацією дефектів / *І.Р. Ващишак* // *Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб.* – Х.: Техніка, 2011. – Вип. 101. – С. 199-207. – (Серія «Технічні науки і архітектура»).

Надійшла до редакції 14.04.12