

УДК 620.9

ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ПІДЗЕМНИМИ ТЕПЛОВИМИ МЕРЕЖАМИ З УРАХУВАННЯМ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

І.Р. Ващишак, В.С. Цих

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. 504708,
tdm@nung.edu.ua*

Розглянуто актуальність дослідження енергетичної ефективності теплових мереж теплопостачальних підприємств з метою виявлення понаднормативних втрат теплової енергії та визначення рівня втрат теплової енергії. Проаналізовано методіку розрахунку нормативних втрат теплоти в теплових мережах відповідно до вимог нормативних документів. Встановлено що для об'єктивної оцінки енергетичної ефективності теплових мереж централізованих систем теплопостачання потрібно повсюдне впровадження приладів обліку теплової енергії та вдосконалення і актуалізація методичної бази для визначення теплових втрат у підземних теплових мережах за показниками приладів обліку теплової енергії встановлених на теплових мережах і у теплових споживачів. Наведено класифікацію вологісного режиму теплової ізоляції трубопроводів теплових мереж для кожного виду прокладки. На основі порівняльного аналізу розрахунку питомих теплових втрат на ділянці підземної теплової мережі показано значний вплив вологості ґрунту на відхилення фактичних втрат від нормативних. Удосконалено методіку розрахунку втрат теплової енергії трубопроводами підземних теплових мереж шляхом урахування впливу вологості ґрунту.

Ключові слова: енергетична ефективність, підземні трубопроводи, теплові мережі, теплові втрати, вологість ґрунту.

Рассмотрена актуальность исследования энергетической эффективности тепловых сетей теплоснабжающих предприятий с целью выявления сверхнормативных потерь тепловой энергии и определения уровня потерь тепловой энергии. Проанализирована методика расчета нормативных потерь теплоты в тепловых сетях в соответствии с требованиями нормативных документов. Установлено, что для объективной оценки энергетической эффективности тепловых сетей централизованных систем теплоснабжения нужно повсеместное внедрение приборов учета тепловой энергии и совершенствование и актуализация методической базы для определения тепловых потерь в подземных тепловых сетях по показаниям приборов учета тепловой энергии, установленных на тепловых сетях и в тепловых потребителях. Приведена классификация влажностного режима тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей для каждого вида прокладки. На основе сравнительного анализа расчета удельных тепловых потерь на участке подземной тепловой сети показано значительное влияние влажности грунта на отклонение фактических потерь от нормативных. Усовершенствована методика расчета потерь тепловой энергии трубопроводами подземных тепловых сетей путем учета влияния влажности грунта.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, подземные трубопроводы, тепловые сети, тепловые потери, влажность грунта.

The actuality of energy efficiency investigation for heating networks that are used at heat supply organizations is considered. It's done in order for abnormal heat losses detection and nominal level of heat losses evaluation. The methodology of normative heat losses in heat networks calculating in accordance with the normative documents requirements is analyzed. It is adjusted that for objective estimation of energy efficiency for the heating networks of host-based heating systems it needs an all-round implementation of heat energy instrument gages. Also it needs a refinement and actualization of methodological base for heat loses in buried heating networks location due to the registration on heat energy instrument gages that are placed directly at heating systems or heat consumers. Classification of moisture conditions for thermal coating of the heating network pipelines for each construction type is described. Based on comparative analysis of the specific heat losses in segment of buried heating pipe it is

showed a substantial impact of soil moisture for actual heat losses deviation. The methodology for heat losses calculating in buried heat networks with the impact of soil moisture including is improved.

Key words: energy efficiency, buried pipelines, heating systems, heat loss, soil moisture

Вступ

На даний час тепlopостачальні підприємства України чи не найбільше потерпають від постійного зростання цін на енергоносії. Ситуацію ускладнює і недостатньо ефективне використання паливно-енергетичних ресурсів, обумовлене тим, що основне обладнання вичерпало свій ресурс. У котельнях втрачається до 8-10 % виробленого тепла, а в теплових мережах – 18-30 %.

Саме тому, дослідження енергетичної ефективності теплових мереж підприємства, що дозволяє визначити рівень втрат теплової енергії та виявити понаднормативні, є актуальним завданням. За результатами проведених енергетичних обстежень розробляють заходи щодо енергетичного заощадження. Це дає змогу здійснити загальну економію енергоресурсів, можливість визначити енергоефективність системи тепlopостачання, спрогнозувати споживання паливно-енергетичних ресурсів в майбутньому, і, найголовніше, мінімізувати втрати енергоресурсу під час передачі теплової енергії кінцевому споживачу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Основне призначення будь-якої системи тепlopостачання полягає в забезпеченні споживачів необхідною кількістю теплоти належної якості. Якість теплової енергії визначається її температурним рівнем, який задається температурним графіком.

Аналіз стану теплових мереж тепlopостачальних підприємств міста показує про наявні понаднормативні втрати теплової енергії, що спричинені понаднормативним терміном експлуатації трубопроводів, а також умовами пролягання трубопроводів та відсутністю постійного контролю їх технічного стану [1]. Встановлено, що сучасні підходи до визначення енергетичної ефективності підземних теплових мереж доцільно спрямувати на розробку методики розрахунку нормативних втрат теплової енергії відповідно до вимог нормативних документів з урахуванням умов пролягання трубопроводів та впливу зовнішніх факторів.

Оскільки відшкодування втрат теплової енергії при транспортуванні теплоносія здійснюється шляхом включення такої вартості в рахунки на оплату кінцевими споживачами,

точність їх розрахунку є досить актуальною задачею.

Таким чином, для об'єктивної оцінки енергетичної ефективності теплових мереж централізованих систем тепlopостачання потрібно дослідити методику визначення теплових втрат в теплових мережах та розробити ряд заходів для зниження рівня понаднормативних втрат теплової енергії.

Розрахунок нормативних втрат теплової енергії в мережах проводиться за вимогами КТМ 204 Україна 244-94 [2] окремо за тепловими мережами, приєднаними до кожного теплогенеруючого джерела за звітний період. Розрахунок виконується окремо для трубопроводів кожного діаметру та типу прокладки.

Фактичні втрати теплоти в теплових мережах залежать від їх протяжності та діаметрів, способу прокладки, типу та стану теплоізоляції, ґрунтових умов, строку служби, умов експлуатації та ін. і визначаються на підставі відповідних випробувань технічно справних трубопроводів.

Теплові втрати в теплових мережах визначаються як сума втрат теплоти з витоків води з трубопроводів та втрат теплоти за рахунок охолодження води в трубопроводах [2].

Уточнені розрахунки втрат теплоти в теплових мережах, що враховують тип теплоізоляції трубопроводів, наявність опор, арматури та компенсаторів на ділянках підземних тепломереж, виконують згідно наступної залежності [2]:

$$Q = q_n \cdot l \cdot \beta \cdot 10^{-6} \cdot \tau \cdot 3.6, \quad (1)$$

де Q – втрати теплоти, ГДж в рік; q_n – норма теплових втрат, Вт/м; l – протяжність трубопроводів, м; τ – число годин роботи, год; β – коефіцієнт, який враховує втрату теплоти опорами, арматурою та компенсаторами, що приймається при безканальній прокладці 1,15; в тунелях та каналах – 1,2; при надземній прокладці – 1,25.

Норми теплових втрат визначаємо з таблиць додатків Д.2.6-Д.2.9 КТМ 204 Україна 244-94 [2] відповідно до температурного графіку та діаметрів трубопроводів підземних теплових мереж. Крім того, слід врахувати коефіцієнт, що враховує зміну норм щільності теплового потоку при застосуванні теплоізоляційного шару з пінополіуретану.

Для порівняльного аналізу розрахунків втрат теплової енергії в підземних теплових мережах системи теплопостачання проводився на 33 ділянках теплотрас. Для визначення нормативних втрат теплової енергії в підземних теплових мережах було використано онлайн-програму для розрахунку втрат тепла в трубопроводах теплових мереж [3], яка базується на застосуванні розрахунку відповідно до вимог [2]. Розрахунок величини теплових втрат виконаний за нормативною щільністю теплового потоку через ізольовану поверхню трубопроводу. Втрати тепла для діаметрів труб і температур теплоносія, що не наведені в таблицях, визначені методами інтерполяції та екстраполяції.

Розрахунок дійсних значень втрат теплової енергії на обігрів будівель в системі теплопостачання проведемо на основі методики, викладеної в БН В.2.5-39:2008 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі», НПАОП 0.00-1.11-98 «Правила будови та безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води», ДСТУ-Н Б В.2.5-35:2007 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі та мережі гарячого водопостачання з використанням попередньо теплоізованих трубопроводів».

Вхідними даними для розрахунку є значення теплотехнічних характеристик, отриманих в ході проведення інструментального вимірювання, зокрема, значення усереднених за результатами кількох вимірювань температур теплоносія на початку і в кінці подавального та зворотного трубопроводу, значення витрат теплоносія на окремих ділянках, а також дані про геометричні параметри трубопроводів магістральних теплових мереж.

Теплові втрати з одного метра труби за одну годину розраховуються за формулою:

$$q = k \cdot (t_B - t_C), \quad (2)$$

де t_B – температура води в трубопроводі, °С;
 t_C – температура навколишнього середовища, °С;
 k – лінійний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м·°С).

Лінійний коефіцієнт теплопередачі визначається за виразом:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_T} \cdot \ln\left(\frac{d_{3T}}{d_{BT}}\right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_I} \cdot \ln\left(\frac{d_{3I}}{d_{BI}}\right) + \frac{1}{\alpha_{3I} \cdot d_{3I}}}, \quad (3)$$

де λ_T – коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби, Вт/(м·°С); λ_I – коефіцієнт теплопровідності теплової ізоляції, Вт/(м·°С); d_{BT} , d_{3T} – внутрішній і зовнішній діаметри труби відповідно, м; d_{BI} , d_{3I} – внутрішній і зовнішній діаметри ізоляції відповідно, м; α_{3I} – коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні теплової ізоляції, Вт/(м²·°С).

Розрахунок реальних втрат проводився в тій же онлайн-програмі, що і розрахунок нормативних теплових втрат [3], враховуючи фактичні температури теплоносія і навколишнього повітря, товщину і властивості теплової ізоляції. Наведена програма дозволяє найбільш точно розрахувати фактичні теплові втрати з трубопроводу, так як заснована на алгоритмі проходження тепла через циліндричну стінку.

Оцінка фактичних теплових втрат для середньорічних умов виконується шляхом їх зіставлення із відповідними значеннями теплових втрат, визначених по Нормам.

Аналіз кількості відпущеної теплової енергії та величини розрахованого на основі проведених вимірювань значення нормативних втрат теплової енергії, що подається споживачам, показав:

– є ділянки, на яких дійсні втрати не перевищують нормативні більше ніж на 10 %, тобто є в межах допустимого відхилення від нормативних втрат на підприємстві або повністю співрозмірні з ними;

– крім того, є ділянки, на яких фактичні втрати є суттєво нижчими від нормативних, більше ніж на 11-20 %. Це насамперед пов'язано із заміною старих трубопроводів з мінераловатною ізоляцією на даних ділянках на нові з пінополіуретановою (ППУ) ізоляцією за останні два роки. Однак на деяких ділянках відхилення складає 19 %, але модернізації теплових мереж не відбувалося. Це може свідчити про неточності при розрахунку нормативних втрат і дана величина потребує корегування, а ділянка – повторного обстеження;

– є ділянки, на яких фактичні втрати є суттєво вищими від нормативних, більше ніж на 26-38 %. Це насамперед пов'язано з виявленими витокami теплоносія на даних ділянках. Дані ділянки потребують першочергового ремонту та

повторного енергетичного обстеження;

– крім того, є ділянки, на яких фактичні втрати є несуттєво вищими від нормативних, більше ніж на 10 %. Тому понаднормативні втрати теплової енергії можуть бути спричинені і впливом зовнішніх факторів, таких як підвищена вологість ґрунту на даних ділянках, підтоплення, прокладання тепломережі з порушеннями вимог ДБН, тощо.

Таким чином, аналіз кількості відпущеної теплової енергії та величини розрахованих нормативних втрат теплової енергії, що подається споживачам, показав що сумарні втрати теплової енергії в трубопроводах підземних теплових мереж перевищують нормативні на 5 %. Однак значення відхилення по окремих ділянках теплових мереж дав змогу встановити, що наявні значні резерви підвищення енергоефективності її роботи.

Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми, якій присвячується стаття

Необхідно відзначити, що в даний час відсутні достовірні дані про втрати в теплових мережах через низький рівень оснащення теплових джерел і споживачів приладами обліку теплової енергії. Величину теплових втрат в теплових мережах оцінюють за результатами випробувань окремих ділянок. Визначена таким чином величина може істотно відрізнятись від дійсної величини в силу цілого ряду обставин, головними з яких є суттєва відмінність теплоізоляційних властивостей різних ділянок теплових мереж. Крім того, в розрахунок нормативних теплових втрат береться усереднене значення температури та вологості ґрунту.

Відомі методики розрахунку теплових втрат в теплових мережах мають ряд недоліків:

а) значення коефіцієнтів теплопровідності теплоізоляційних матеріалів, наведені в [2], відносяться до матеріалів в абсолютно сухому стані, що абсолютно неприйнятно для трубопроводів підземної прокладки;

б) неврахування поправочних коефіцієнтів на зволоження матеріалів теплової ізоляції залежно від вологості ґрунту;

в) не вказуються реальні терміни допустимої експлуатації теплоізоляційних і покривних матеріалів і не наводяться поправочні коефіцієнти на термін експлуатації.

Ці недоліки пояснюються складністю досить надійного і однозначного визначення вихідних даних для реальних умов експлуатації трубопроводу: коефіцієнта теплопровідності

ґрунту, глибини залягання трубопроводу, вологості теплової ізоляції, ступінь її руйнування і багато іншого. Крім того, необхідно відзначити, що КТМ 204 Україна 244–94ТМ [2], як нормативний документ, орієнтований на справні і правильно сконструйовані конструкції теплових мереж, а нестандартні ситуації для трубопроводів з порушенням теплової ізоляції та покривного шару взагалі не розглядаються. На жаль, в реальній практиці саме такі ситуації зустрічаються все частіше. Основними причинами такого стану є перевищення нормативних термінів експлуатації теплової ізоляції через нестачу фінансових коштів на її реконструкцію, а також значне підвищення вологості теплової ізоляції трубопроводів під землею через проникнення ґрунтових і стічних вод у зв'язку з незадовільним станом дренажної системи теплових мереж.

Таким чином, для об'єктивної оцінки енергетичної ефективності теплових мереж централізованих систем тепlopостачання потрібно повсюдне впровадження приладів обліку теплової енергії та вдосконалення і актуалізація методичної бази для визначення теплових втрат у підземних теплових мережах за показниками приладів обліку теплової енергії встановлених на теплових мережах і у теплових споживачів.

Висвітлення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням одержаних наукових результатів

У розрахунок теплових втрат тепловими мережами не враховано зволоження теплової ізоляції трубопроводів, яке відбувається за рахунок сорбції вологи з ґрунту внаслідок проникнення води через порушений захисний покривний шар в затоплених каналах. Особливо це актуально для безканальної прокладки, коли шар ізоляції контактує із шаром вологого ґрунту.

Слід зазначити, що наявність гідроізоляції при безканальній прокладці позначається позитивно лише при її герметичності. При порушеннях герметичності з'являється можливість намокання теплової ізоляції. При чому, досить навіть невеликих отворів в покривному шарі, щоб могло статися інтенсивне намокання теплової ізоляції в разі затоплення каналу або підйому ґрунтових вод при безканальній прокладці. Подальше висихання теплової ізоляції утруднено саме наявністю шару гідроізоляції, що перешкоджає виходу пари з ізоляції назовні, і тим самим значно

погіршує умови висушування ізоляції. У цих умовах шар гідроізоляції стає бар'єром для виходу вологи і процес висушування зтягується, у багато разів перевищуючи по тривалості процес намокання. На жаль, в більшості ситуацій ідеального, абсолютно герметичного шару не існує, і в підземних прокладках завжди присутня можливість намокання ізоляції за рахунок підняття ґрунтових вод або затоплення трубопроводу побутовими стоками.

Слід зазначити, що при каналній прокладці для відводу вологи з каналу обов'язково повинна справно працювати дренажна система, що буває далеко не завжди. При цьому навіть і не передбачається, що покривний шар повинен виконувати гідроізоляційні функції. Тому покривний шар спочатку має велику кількість щілин або пор, через які волога при несприятливих умовах може легко проникати до шару ізоляції.

На підставі літературних даних [4, 5] можна відзначити найбільш важливі моменти вологісного режиму теплової ізоляції трубопроводів теплових мереж для кожного виду прокладки.

Підземна канална прокладка.

У розрахунках тепловтрат при підземній каналній прокладці температура повітря в каналі приймається, в більшості випадків, рівною температурі ґрунту, тобто в діапазоні від -5 до $+10$ °С. При таких температурах вологість повітря в каналі близька до 100%, що призводить до рясної конденсації на днище, стінки та покриття каналу. Покриття каналу, як правило, має найнижчу температуру, оскільки розташоване найближче до поверхні землі. Саме на ньому відбувається конденсація, в результаті чого краплі води потрапляють знову на конструкцію теплопроводу і зволожують її. При високій відносній вологості відбувається більш швидке старіння як самої теплової ізоляції, так і покривного шару.

Крім того, слід зазначити, що в каналній прокладці покривний шар не виконує гідроізолюючої функції, а тільки утримує основний шар теплової ізоляції від розсіпання. Слід вважати, що покривний шар знаходиться в нормальному стані і вологість ізоляції залежить тільки від наявності води в каналі.

У міських умовах підземні трубопроводи знаходяться в різних режимах, зважаючи на велику кількість додаткових чинників: різного стану їх дренажної системи, рівня ґрунтових вод, наявності промислових і побутових стоків, стану зливної каналізації, наявності асфальтового покриття. Тому стосовно

каналній прокладки використаємо наступний розподіл каналів по їх вологісного стану:

1. Канал сухий. Для каналній прокладці при відсутності води в каналі зволоження теплової ізоляції невелике. Середня вологість матеріалів може бути прийнята в межах 0,4 % для мінеральної вати і 4% для поропластів. Вводити поправочні коефіцієнти в цій ситуації не потрібно.

2. Канал підтоплений. Для каналній прокладці при наявності води на дні каналу має місце зволоження теплової ізоляції, однак воно буде помірним, так як зволоження буде відбуватися лише за рахунок сорбції вологи з повітря і за рахунок вологи, що стікає з перекриття каналу. Для мінеральної вати дія капілярних сил невелика, тому надлишок вологи повинен стікати в нижню частину конструкції, що не дозволить сильно намокнути всій конструкції ізоляції. Для дрібнопористих матеріалів типу фенольного поропласту і пінополіуретану вплив капілярних сил значно більший, і волога утримуватиметься. Тому при відсутності герметичного покривного шару вологість такої ізоляції буде значно вищою. Середні значення вологості матеріалів можна прийняти наступні: 5% для мінеральної вати, 15% для поропластів і пінополіуретану.

3. Канал затоплений. Це означає, що на дні каналу є вода, рівень якої сягає, як мінімум, низу конструкції трубопроводів, тобто торкається теплової ізоляції. Зволоження теплової ізоляції досить велике. Як зазначалося вище, покривний шар не буває герметичним, і він не здатний в цих умовах захистити ізоляцію від намокання. Частина або уся ізоляція знаходиться в режимі повного насичення вологою. При частковому затопленні трубопроводу волога може бути розподілена нерівномірно по висоті, так що середня вологість ізоляції залежить від рівня води в каналі. Середні значення вологості матеріалів можна прийняти наступні: 20% для мінеральної вати, 80% для поропластів чи пінополіуретану.

Підземна безканална прокладка

При підземній безканалній прокладці температура поверхневого шару ізоляції дорівнює температурі ґрунту для розглянутого періоду, тобто в діапазоні від -5 до $+10$ °С. При високій відносній вологості відбувається швидке старіння як самої теплової ізоляції, так і покривного шару. Вологість ізоляції в основному залежить від вологості ґрунту.

При термінах експлуатації до 0,5 нормативного терміну експлуатації вважається, що покривний шар знаходиться в справному нормальному стані і оберігає ізоляцію від

надмірного зволоження. Однак, з огляду на те, що трубопровід весь час знаходиться у вологому середовищі, вологість ізоляції досить висока навіть при наявності справного гідроізоляційного шару. При низьковологих ґрунтах з урахуванням захисної дії гідроізоляційного шару можна прийняти значення вологості ізоляції на рівні 2%; при вологому ґрунті – 4%; при ґрунті, насиченому водою – 25%.

У випадку терміну експлуатації покривного шару більше 0,5 нормативного слід вважати, що покривний шар частково зруйнувався і вже не виконує повністю своїх гідроізоляційних властивостей. При низьковологих ґрунтах зволоження теплової ізоляції для безканальної прокладки з урахуванням захисної дії гідроізоляційного шару може становити близько 3%; при вологому ґрунті – 6%; при ґрунті,

насиченому водою, – 40%.

При термінах експлуатації покривного шару більше нормативного слід вважати, що покривний шар повністю зруйнувався і абсолютно не виконує своїх гідроізоляційних властивостей. При низьковологих ґрунтах зволоження теплової ізоляції становить близько 6%; при вологому ґрунті – 13%; при ґрунті, насиченому водою, – 80%.

Таким чином, це говорить про те, що для забезпечення точності розрахунку тепловтрат через ізоляцію необхідно використовувати відкориговані з урахуванням вологості коефіцієнти теплопровідності ізоляції. Особливо це суттєво при прокладці трубопроводів безпосередньо в ґрунт.

Відповідно до виразів (1) – (3) теплові втрати розраховуються за формулою:

$$q = \frac{(t_B - t_C)}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_I} \cdot \ln\left(\frac{d_{3I}}{d_{1I}}\right) + \frac{1}{\alpha_{3I} \cdot \pi \cdot d_{3I}}} = \frac{(t_B - t_C)}{R_I + R_{3ОВН}} \quad (4)$$

де R_I – термічний опір шару теплоізоляції, (м·°С)/Вт; $R_{3ОВН}$ – термічний опір назовнішнього середовища, (м·°С)/Вт.

Тепловіддачу від теплоносія до внутрішньої поверхні трубопроводу не враховано у зв'язку з тим, що коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до внутрішньої стінки труби значно більший коефіцієнта тепловіддачі від зовнішньої поверхні теплоізоляції до назовнішнього ґрунту. Термічним опором стінки трубопроводу і термічним опором гідроізоляції також можна знехтувати, зважаючи на високу теплопровідність стінки і малу її товщину.

При підземній каналній прокладці залежність (3) є прийнятною для розрахунку. Однак, при підземній безканальній прокладці тепло з поверхні захисного шару передається безпосередньо ґрунту, тобто $R_{3ОВН} = R_G$.

Значення R_G визначається за відомою формулою Форхгеймера [6]:

$$R_G = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_G} \cdot \ln \left[\frac{2 \cdot h}{d_{3I}} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot h}{d_{3I}}\right)^2 - 1} \right] \quad (5)$$

де λ_G – коефіцієнт теплопровідності ґрунту, Вт/(м·°С); h – глибина залягання осі трубопроводу, м.

Коефіцієнт теплопровідності ґрунту λ_G залежить від його структури і вологості, значення змінюється в досить широких межах: від 1 для пісків до 3 для глинистих ґрунтів в насиченому вологою стані.

Для двотрубною безканальною прокладкою додатково слід врахувати умовний термічний опір ґрунту, що враховує зниження тепловіддачі від трубопроводів за рахунок більш сильного прогріву шару ґрунту між трубопроводами. Цей опір визначається за формулою:

$$R_{ДОД} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_G} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot h}{b}\right)^2} \quad (6)$$

де b – горизонтальна відстань між осями труб, м.

Таким чином, формула для розрахунку втрат теплової енергії набуде вигляду:

$$q = \frac{(t_B - t_C)}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_I} \cdot \ln\left(\frac{d_{3I}}{d_{BI}}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_G} \cdot \left[\ln\left[\frac{2 \cdot h}{d_{3I}} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot h}{d_{3I}}\right)^2 - 1} \right] + \ln\left[\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot h}{b}\right)^2} \right] \right]} \quad (7)$$

Проаналізуємо зміну величини теплових втрат при різних вологостях ґрунту. Для зручності аналізу всі графіки побудуємо для однієї підземної ділянки тепломережі прокладеної безканалним способом: діаметр труб – 0,1 м; глибина залягання – 1,5 м; товщина гідроізоляції – 0,005 м, відстань між осями – 0,7 м. Температура зовнішнього повітря – 1 °С, температури в подавальному і зворотному трубопроводах відповідно рівні 95 °С та 45 °С.

Теплопровідність матеріалів ізоляції та ґрунту при різній вологості взято з довідників і наведено у табл. 1.

Таблиця 1 - Теплопровідність матеріалів

Матеріал	Тепло-провідність, Вт/(м·°С)
Мінеральна вата	0,052
Пінополіуретан	0,035
Ґрунт сухий	0,4
Ґрунт, 8% води	1,12
Ґрунт, 15% води	1,36
Ґрунт, 20% води	1,63
Ґрунт, 40% води	2,0

На рис. 1 наведено вплив зміни вологості ґрунту для пінополіуретанової ізоляції трубопроводів різної товщини, а на рис. 2 – для пінополіуретанової та мінераловатної ізоляції товщиною 3 см обидві.

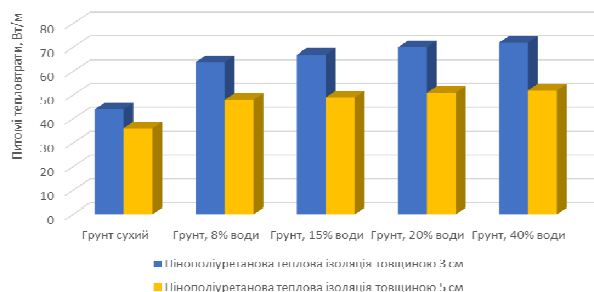


Рисунок 1 - Вплив вологості ґрунту на питомі теплові втрати при ППУ ізоляції трубопроводів.

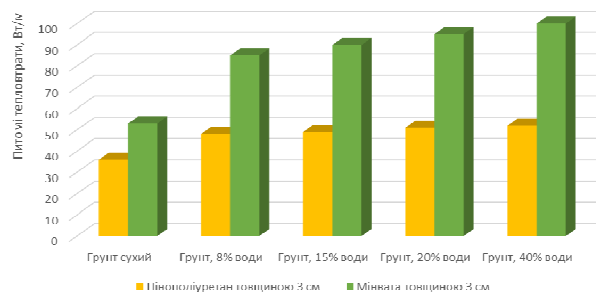


Рисунок 2 - Вплив вологості ґрунту на питомі теплові втрати при ППУ та мінераловатній ізоляції трубопроводів однакової товщини.

Питомі теплові втрати при пінополіуретановій та мінераловатній ізоляції трубопроводів товщиною 3 см без урахування впливу вологості ґрунту складають: 55 Вт/м – для мінераловатної ізоляції, 42 Вт/м – для ППУ ізоляції. Для аналізованої ділянки питомі теплові втрати при мінераловатній ізоляції товщиною 3 см складають 53 Вт/м, при цьому значення, вибране з [2], становить 55 Вт/м, що говорить про неврахування вологості ґрунту. Отже, ґрунт повністю сухий. При зволоженні ґрунту до 40% питомі тепловтрати зростають майже вдвічі. При ППУ ізоляції вплив вологості ґрунту значно менший: при сухому ґрунті 44 Вт/м, а при зволоженні до 40% – 72 Вт/м, тобто зростає більше ніж в 1,5 рази. При збільшенні товщини ППУ ізоляції питомі тепловтрати зменшуються, однак вплив вологості ґрунту прослідковується аналогічно. Це свідчить про те, що збільшенням товщини ізоляційного покриття не можна усунути вплив вологості ґрунту на питомі тепловтрати. Таким чином, при розрахунку теплових втрат підземними тепловими мережами не можна не рахуватись з можливим зволоженням ізоляційного матеріалу за рахунок вологи ґрунту.

ВИСНОВКИ

Порівняльний аналіз розрахунку питомих теплових втрат на ділянці підземної теплової мережі показав, що відхилення фактичних втрат від нормативних не завжди може бути спричинене незадовільним станом самої підземної теплової мережі, а зумовлене значним впливом вологості ґрунту.

На основі проведених розрахунків встановлено, що при визначенні нормативних втрат теплової енергії в підземних теплових мережах необхідно передбачити визначення вологості ґрунту на даних ділянках, що дозволить значно підвищити точність розрахунку, оскільки при зростанні вологості ґрунту до 40 %, питомі тепловтрати для мінераловатної ізоляції зростають вдвічі, для ППУ ізоляції – в 1,2 рази.

1. *Енергетичний аудит об'єктів житлово-комунального господарства: Монографія* / В.П. Розен, О.І. Соловей, С.В. Бржестовський, А.В. Чернявський, П.В. Розен // під заг. ред. В.П. Розена, О.І. Солов'я. – К.: ПП ВКФ «ДЕЛЬТА ФОКС», 2007. – 224 с. 2. «Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні». КТМ 204 Україна 244–94. – К.:ЗАТ „ВПОЛ”. - 2001. – 376 с. 3. *Расчёт потерь*

*тепла с трубопроводов тепловых сетей [электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.ktto.com.ua>. 4. Иванов В.В. Влияние увлажнения изоляции и грунта на тепловые потери подземных теплотрасс / В.В. Иванов, Н.В. Букаров, В.В. Василенко // *Новости теплоснабжения*. – 2002. – №7(23). – с.32-36. 5. S. *Heat loss calculations in heating systems* / N. Kanev, A. A. Ivashkevich. [E-resource]. – mode of access: <https://www.cedengineering.com>. 6. *Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди Теплові мережі: ДБН В.2.5-39-2008. – [Чинний від 2009-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 55 с.**

Поступила в редакцію 25.03.2017 р.

Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Середюк О.Є., докт. техн. наук, проф. Костишин В.С.