

УДК 697.343

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ПОПЕРЕДНЬО ІЗОЛЬОВАНИХ ТРУБ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Божко І.К., канд. техн. наук канд.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2020.9>

Статтю присвячено питанням застосування сучасної теплової ізоляції на основі поліуретанової піни і циклопентану в ролі спінюючого агента. Також, в роботі приділено увагу питанню захисту теплової ізоляції від деструктивних процесів в перебігу терміну експлуатації трубопроводу.

Статья посвящена вопросам применения современной тепловой изоляции на основе полиуретановой пены и циклопентана в качестве вспенивающего агента. Также, в работе уделено внимание вопросу защиты тепловой изоляции от деструктивных процессов в течении срока эксплуатации трубопровода.

The article is devoted to the use of modern thermal insulation based on polyurethane foam and cyclopentane as a blowing agent. Also, the work focuses on the issue of protecting thermal insulation from destructive processes during the life of the pipeline.

Бібліографія 15, рис. 7, табл. 2.

Ключові слова: тепла ізоляція, циклопентан, дифузія, енергозбереження.

1. Вступ

За статистикою 90% нашого часу ми проводимо в будівлях, переважно більшість з яких приєднано до системи централізованого теплопостачання, на яку припадає більша частина кінцевого споживання первинної енергії. В Україні житлово-комунальний сектор споживає більше 40% виробленої теплової енергії, а ефект від впровадження необхідних енергозберігаючих заходів в цій сфері, в масштабі країни, перевищує можливість економії ресурсів в таких традиційно енергоємних галузях, як металургія, хімічна промисловість і ін. [1]. Тільки при транспортуванні теплоносія від джерела до споживача відбувається втрата до 30% теплової енергії [2]. За рахунок цього, спостерігається нераціональне використання дорогого первинного палива та підвищення рівня викидів CO_2 і NO_x в атмосферу.

У той же самий час, існуючі трубопроводи тепло-трас мають високу ступінь зношеності – до 80% всіх трубопроводів знаходяться в експлуатації 15 років і більше [3]. Тільки в м. Київ прокладено понад 2 000 км тепло-трас різних діаметрів [4] і, відповідно до статистики, близько 800 км з них мають ступінь зносу понад 70% і потребують заміни найближчим часом [5].

Вирішення цих задач вимагає значних капіталовкладень і внаслідок цього вимоги до надійності і термічного опору теплопередачі ізоляційної оболонки трубопроводів теплових мереж досить високі, що цілком виправдано.

Починаючи з 2002 року, в Україні створена і постійно вдосконалюється нормативна база, яка регламентує застосування в зовнішніх мережах попередньо ізольованих трубопроводів (ПІТ) зі сталі і полімерних матеріалів як українського, так і європейського виробництва. Сталеві трубопроводи застосовуються для транспортування теплоносія з температурою до 150 °C і робочим надлишковим тиском до 1,6 МПа, труби з полімерних матеріалів – для теплоносія з температурою до 100 °C і робочим тиском до 1,0 МПа [6, 7].

З кожним роком технології виготовлення ПІТ удосконалюються – застосовуються як нові матеріали труб, так і нові типи ізоляції і системи її захисту від негативних ефектів в процесі експлуатації трубопроводів.

2. Характеристики теплової ізоляції ПІТ

На сьогоднішній день, існує ряд технологій, за якими виготовляються ПІТ для тепло-трас – в основному застосовується тепла ізоляція у вигляді піни з поліуретану (PUR) і поліізоціанурата (PIR) [8].

Ізоляція PUR має ряд переваг – низьку теплопровідність, високу адгезію до поверхні труби, високу механічну міцність. Піна з поліуретану на 92% складається з порожнин, заповнених сумішшю газів і на 8% з твердого полімеру, що утворює стінки між комірками піни. Розмір комірок залежить від застосованого спінюючого агента, який також впливає на теплоізоляційні властивості пінополіуретану. Чим

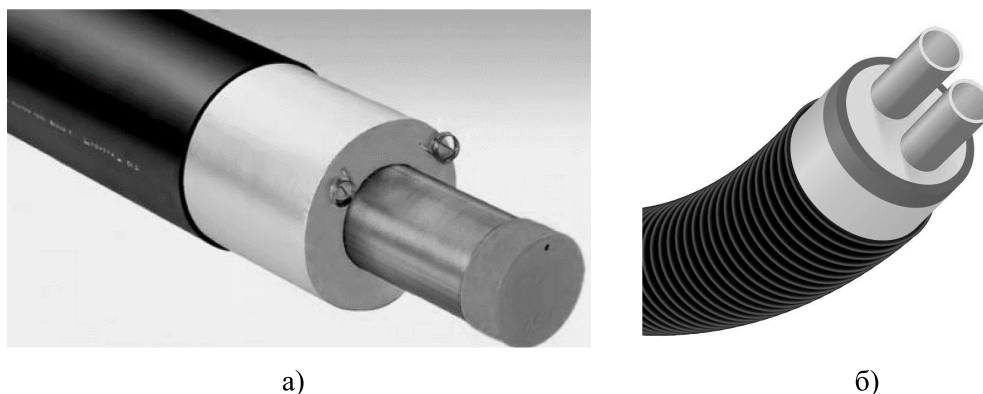


Рис. 1. Загальний вигляд ПІТ: а) сталева труба з тепловою ізоляцією PUR, захисним шаром PE-HD і дифузійним бар'єром з алюмінієвої фольги; б) подвійна труба із зшитого поліетилену PE-X з тепловою ізоляцією PUR, що знаходиться в захисному гофрованому кожусі із зшитого поліетилену XPE з дифузійним бар'єром

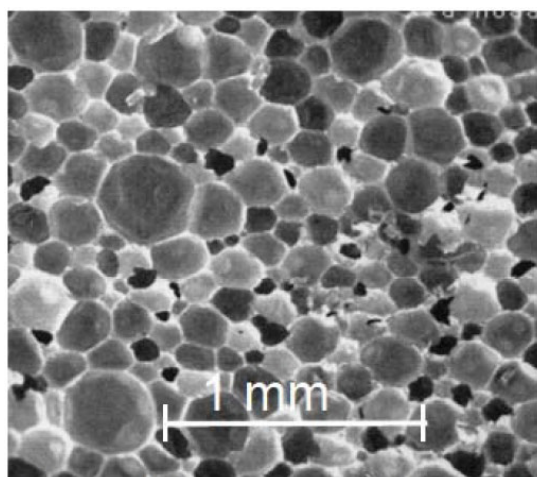


Рис. 2. Структура поліуретанової піни, що спінена із застосуванням циклопентану [9]

Таблиця 1. Теплофізичні і екологічні властивості газів, що використовуються в якості спінюючих агентів і виділяються при виробництві PUR ізоляції [10]

Позначення	Вуглекислий газ	Циклопентан	HFC-365mfc	HFC-245fa	CFC-11
Формула	CO_2	C_5H_{10}	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_2\text{CH}_3$	$\text{CHF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$	CCl_3F
Температура кипіння, °C	-78,5	49,3	40,2	15,3	23,7
Тиск газу при +25 °C, бар	64,3	0,42	0,47	1,23	1,1
Теплопровідність газу при +25 °C, Вт/м·К	0,016	0,012	0,012	0,013	0,008
Потенціал виснаження озонового шару, 100 років	0	0	0	0	1
Потенціал глобального потепління, 100 років	1	<10	868	985	4650

менше розмір порожнини, тим менш інтенсивний радіаційний теплообмін між сусідніми комірками. У той же час, чим нижче щільність піни, тим нижче теплопровідність через структуру полімеру [9].

На окрему увагу заслуговує питання вибору спінюючого агента, що застосовується при виробництві спіненої теплової ізоляції PUR. До 2002 року в ролі спінюючого агента широко застосовувалися хлорфторвуглеці (CFC). Але, внаслідок їх негативного впливу на озоновий шар Землі, в 2005 році було припинено їх використання. На сьогоднішній день в ролі спінюючого агента для теплової ізоляції ПІТ використовуються циклопентан, вода і гідрохлорфторвуглеці (HCFC), які не несуть серйозної загрози для навколишнього середовища.

Згідно з даними (табл. 1) оптимальним спінюючим агентом є циклопентан. Він має низьку теплопровідність і не несе негативного впливу на навколишнє середовище. При застосуванні циклопентану, ми отримуємо поліуретанову піну, яка має розмір комірок в середньому $0,12 \div 0,15$ мм (рис. 2), щільність піни при цьому становить $50 \div 60$ кг/м³. При цьому, комірки піни заповнені сумішшю газів, серед яких циклопентан, вуглекислий газ, кисень та азот (табл. 2). Тиск газів в комірках складає в середньому $64 \div 87$ кПа, що досить близько до атмосферного тиску [9, 11].

При такій структурі і щільності піни, основним фактором, який пригнічує теплопередачу через теплову ізоляцію PUR є низька теплопровідність суміші газів,

яка «запечатана» в комірках пінополіуретану. Процес теплопровідності через поліуретанову піну складається з теплопровідності газового середовища в порожнинах піни, теплопровідності твердого полімеру (стінок комірок) і радіаційного теплообміну між сусідніми комірками (рис. 3). При цьому, переважаючою є теплопровідність газового середовища.

Таким чином, застосовуючи сучасні технології виробництва PUR піни, ми отримуємо теплоізоляційний матеріал, для якого коефіцієнт теплопровідності становить $0,022 \dots 0,024$ Вт/м•К, в залежності від щільності піни. Для порівняння, коефіцієнт теплопровідності ПІТ, які зараз застосовуються в Україні під час прокладання нових та реконструкції існуючих теплових мереж становить в середньому $0,030 \dots 0,035$ Вт/м•К [6].

3. Вплив вибору технології виробництва на теплотехнічні характеристики ПІТ

На сьогоднішній день широко використовуються дві основні технології виробництва ПІТ – способи переривчастого «disconti» і безперервного «conti» виробництва [12].

Переривчастий спосіб полягає в заповненні поліуретановою піною простору між трубою і покривний захисною оболонкою з поліетилену (HDPE). Для рівномірного заповнення і досягнення однорідної щільності, поліуретанова піна повинна мати високу текучість. Способи заповнення заготовки каталогізовані і в основному використовуються горизонтальне і торцеве заповнення.

Таблиця 2. Склад газів які заповнюють комірки поліуретанової піни [11]

Кисень O ₂ , %	Азот N ₂ , %	Вуглекислий газ CO ₂ , %	Циклопентан C ₅ H ₁₀ , %
0,6	1,3	58,0	40,1

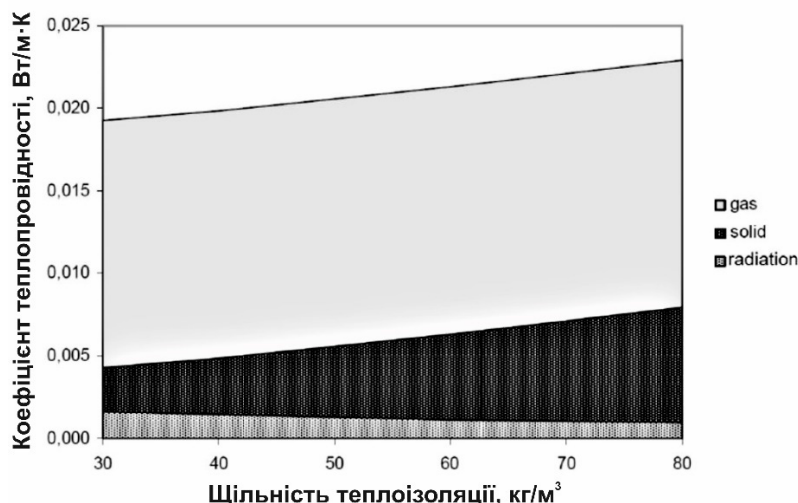


Рис. 3. Вплив щільності поліуретанової піни на коефіцієнт її теплопровідності [12]

Переривчастий спосіб вимагає великих витрат піни для рівномірного покриття всієї труби, сама піна наноситься під високим тиском, що в свою чергу призводить до необхідності потовщення покривного шару і подорожчання конструкції теплоізоляції.

Спосіб безперервного «conti» виробництва є більш прогресивним і технологічно складним. Навколо труби виконується обмежувальний кожух із шару поліетилену і фольги на поліетиленовій основі, які виконують також роль дифузійного бар'єру. Простір між кожухом і трубою заповнюється поліуретановою піною. Далі наноситься захисний покривний шар з поліетилену HDPE (рис. 4).

Застосування в якості спінуючого агенту циклопентана ще більше ускладнює технологію «conti». Справа в тому, що в порівнянні з фреоном, циклопентан більш летючий і вибухонебезпечний, тому при його використанні необхідно дотримуватися підвищені вимоги безпеки. Також, в заливальну машину ізоціонат подається в чистому вигляді, поліол і циклопентан попередньо змішуються і подаються в ємності камери. Цей процес вимагає наявності додаткового обладнання, що відповідає конфігурації заливальних модулів, а перед заливкою трубу, що заливається, необхідно продувати азотом для витіснення кисню, що міститься в повітрі.

Технологія «conti» характеризується меншими витратами піни та її рівномірною товщиною по всій довжині труби. Також, дана технологія дозволяє перед покривним шаром з HDPE нанести дифузійний бар'єр. Даний бар'єр призначений для запобігання дифузії газів з комірок піни в навколишнє середовище. Рідше застосовується дифузійний бар'єр, який інтегрований безпосередньо в покривний шар і розташований між шарами поліетилену HDPE.

Варто відзначити, що на якість ПІТ істотний вплив має те, наскільки виробник дотримується технологічних режимів і процесів. Зважаючи на складність технології виготовлення ПІТ і малих значень коефіцієнта теплопровідності PUR ізоляції – його відхилення на 5-10% (значення менше 0,003 Вт/м•К) може привести до непридатності подальшого застосування трубопроводу, оскільки нівелюється ефект енергозбереження.

Переваги безперервного «conti» способу виробництва ПІТ:

- 1) до 25% зменшення витрат поліуретанової піни і товщини покривного шару;
- 2) отримання рівномірної товщини теплової ізоляції щільністю $50 \div 60 \text{ кг/м}^3$ (щільність піни при переривчастому способі становить до 100 кг/м^3 [9]);
- 3) можливість застосування дифузійного бар'єру для збереження постійних експлуатаційних характеристик теплової ізоляції на протязі життєвого циклу ПІТ.

Таким чином трубопроводи, виготовлені за способом «conti» із застосуванням циклопентану в ролі спінуючого агенту мають істотну перевагу над аналогами. Вони більш технологічні, на відміну від ПІТ виготовлених переривчастим способом «disconti», мають можливість довго зберігати експлуатаційні характеристики (мають дифузійний бар'єр) і, як наслідок, їх застосування дозволяє досягти більшого ефекту енергозбереження.

За технологією «conti» виготовляються як сталеві, так і полімерні ПІТ. Останні виробляються двох основних типів - гнучкі (виробляються і поставляються в бухтах) і жорсткі (відрізки довжиною до 12 м).

Полімерні ПІТ мають ряд переваг над сталевими - гнучкість і як наслідок зручність монтажу, відсутність корозії, самокомпенсація температурних деформацій.

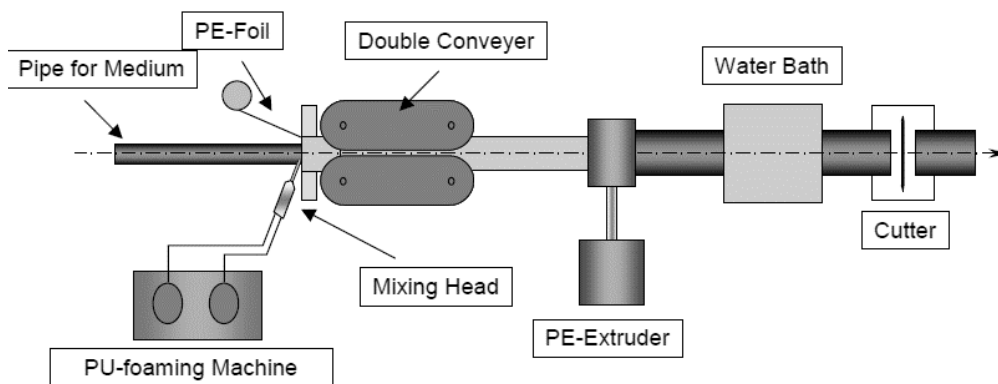


Рис. 4. Безперервний спосіб виготовлення ПІТ «conti» [13]

Полімерні ПІТ доцільно застосовувати в системах централізованого водопостачання (як гарячого, так і холодного), системах теплопостачання від індивідуальних котельних, при реконструкції розподільних теплотрас від центральних теплових пунктів і т.д.

4. Вплив дифузійного бар'єру на теплофізичні характеристики ПІТ

В процесі експлуатації ПІТ ізолюваного поліуретановою піною відбувається її «старіння» - поступове зростання значення коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційної оболонки. Це відбувається внаслідок дифузії молекул повітря в комірки піни і поступового витіснення звідти вуглекислого газу і циклопентану. Даний процес відбувається в тепловій ізоляції як сталевих, так і полімерних ПІТ. Внаслідок заповнення комірок піни повітрям, яке має кращі теплопровідні властивості, відбувається зміна (підвищення) загального коефіцієнта теплопровідності ізоляційного шару. Теплова ізоляція стає менш ефективною, згідно з результатами прогнозних розрахунків [12], витіснення циклопентану і вуглекислого газу з піни погіршує властивості теплової ізоляції в середньому на 20%.

З іншого боку, кисень, який знаходиться в повітрі, також має на пінополіуретан негативний вплив. Проникнення кисню в поліуретанову піну викликає її термічний окисний розклад, внаслідок чого надалі може порушитись цілісність трубопроводів теплопостачання [14].

Дослідження зразків поліуретанової піни взятих зі зразків ПІТ реальної теплової мережі, що знаходилась в експлуатації [15] показують, що з плином часу відбувається часткова руйнація комірок осередків піни з одночасною дифузією повітря в неущожені комірки. Інтенсивність дифузії істотно залежить від температури (рис. 5). Наявність тільки покривного шару з поліетилену HDPE не впливає на інтенсивність дифузії. Тому в якості дифузійного бар'єру часто використовується металева фольга.

Дослідження зразків теплової ізоляції ПІТ [15], показали, що покривний шар з поліетилену HDPE не здатний запобігти дифузії циклопентану. Швидкість і інтенсивність дифузії циклопентану описується другим законом Фіка. Заміщення одного газу іншим визначалося зміною маси зразка з плином часу. Також,

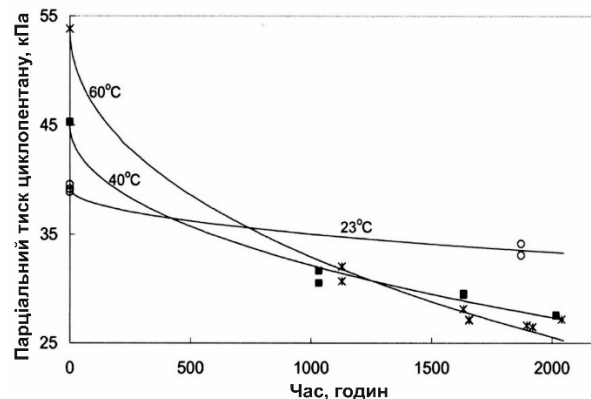


Рис. 5. Зміна парціального тиску циклопентану в осередках поліуретанової піни в плинні часу при різних температурах [15]

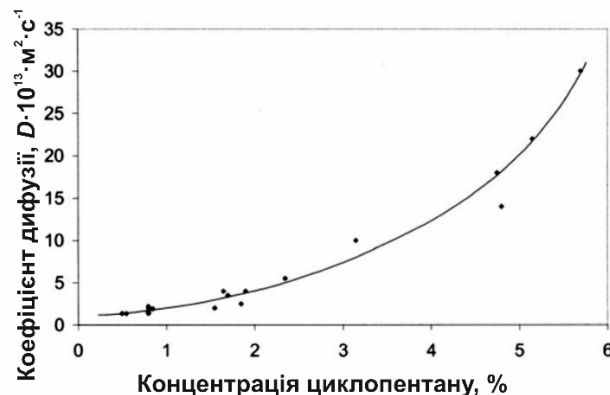


Рис. 6. Залежність коефіцієнта дифузії через поліетилен HDPE від концентрації циклопентану [15]

дослідивши зразки піни і поліетиленового покриттєвого шару методом газової хроматографії, були визначені коефіцієнти дифузії в залежності від концентрації циклопентану (рис.6) і коефіцієнт розчинності циклопентану в поліетилені, який становить $2,3 \times 10^{-2}$ моль/м³·Па при температурі +23 °С.

Дані проведених експериментальних досліджень і прогнозних розрахунків зміни теплофізичних властивостей PUR ізоляції при експлуатації протягом 30 років [12] показують переваги ПІТ з дифузійним бар'єром.

Для виконання прогнозних розрахунків було взято джерело централізованого теплопостачання (районна котельня) і теплотраси, які приєднані до неї. Порівнювалися ПІТ виготовлені переривчастим «disconti» способом і способом «conti» із застосуванням дифузійного бар'єру. Результати показують погіршення експлуатаційних характеристик ПІТ виконаних за «класичною» технології вже через 3 роки експлуатації. При цьому, через відсутність ефекту «старіння» поліуретанової піни, сучасні трубопроводи з дифузійним бар'єром мають практично незмінний коефіцієнт теплопровідності теплової ізоляції протягом всього життєвого циклу трубопроводу.

Порівнювалися також лінійні теплові втрати двох однакових ділянок трубопроводів теплової мережі, яка працює згідно з температурним графіком 120/60 °С. Результати (рис. 7) показують, що при застосуванні ПІТ з дифузійним бар'єром, непродуктивні втрати теплової енергії знижуються в середньому на 20...21%, що, в свою чергу, веде до зниження сум платежів кінцевих споживачів і підвищення якості та ефективності систем централізованого теплопостачання.

Висновки

1. В Україні на сьогоднішній день існує проблема заміни зношених і енергетично неефективних теплових мереж, яка кожен день набирає актуальності. Значна частина первинної енергії витрачається на нагрів ґрунту (або повітря), що знижує якість і ефективність роботи систем централізованого теплопостачання.

2. При заміні існуючих або прокладанні нових теплових мереж доцільно застосовувати сучасні сталеві і полімерні ПІТ. А зважаючи на велику протяжності, навіть незначне зниження коефіцієнта теплопровідності ізоляційної оболонки ПІТ призводить до суттєвої економії теплової енергії і підвищує ресурс роботи самого трубопроводу.

3. Теплова ізоляція ПІТ на 20% ефективніша при застосуванні дифузійного бар'єру і та спінюючого агенту – циклопентану. Даний бар'єр дозволяє досягти рівнозначного коефіцієнта теплопровідності ізоляційної оболонки протягом життєвого циклу ПІТ, який становить 30 років і вище.

4. Технологія виробництва ПІТ і вибір спінюючого агенту мають вирішальне значення в питанні підвищення енергоефективності систем централізованого теплопостачання. Це досягається за допомогою нижчого значення коефіцієнта теплопровідності теплової ізоляції на рівні 0,022...0,024 Вт/м·К. При цьому, застосування дифузійного бар'єру при виготовленні ПІТ дозволяє уникнути поступового підвищення коефіцієнта теплопровідності за рахунок усунення деструктивних ефектів в комірках поліуретанової піни і витіснення циклопентану і вуглекислого газу з них.

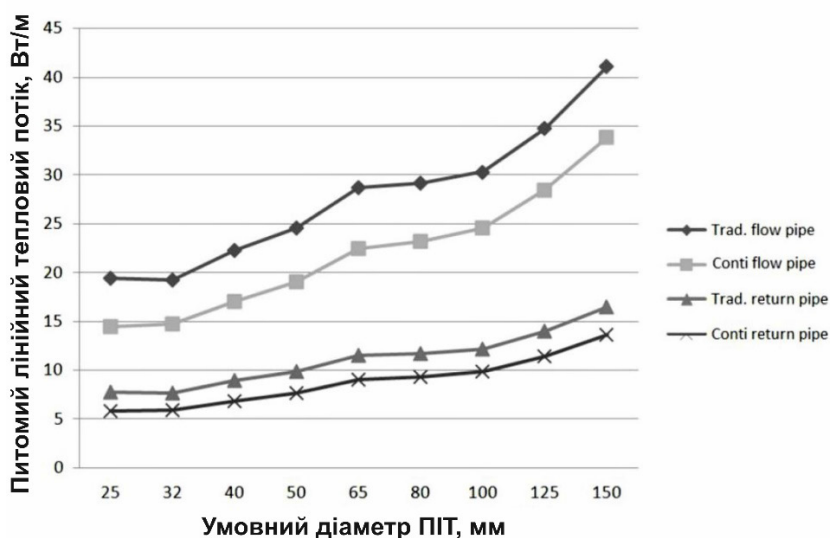


Рис. 7. Залежність питомого теплового потоку від діаметру ПІТ і наявності дифузійного бар'єру [12]

5. Полімерним ПІТ незаслужено приділяється менше уваги при прокладанні нових і особливо при реконструкції існуючих теплотрас. При цьому, саме полімерні трубопроводи мають велику гнучкість, виготовляються різної довжини, що зменшує кількість місць з'єднань, практично не поступаються сталевим трубопроводам в міцності, довговічності і надійності експлуатації і не вимагають компенсації температурних деформацій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Жовтянський В. А., Кулик М. М., Стогній Б. С. Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітично-довідкові матеріали/Колективна монографія в 2-х томах/За ред. Жовтянського ВА, Кулика ММ, Стогнія БС–Т. 1: Загальні засади енергозбереження //К.: Академперіодика. – 2006. – Т. 1. – С. 510.
2. Тарадай А. М. и др. Основные направления модернизации систем теплоснабжения для решения задачи снижения потребления природного газа в Украине //Науковий вісник будівництва. – 2014. – №. 3. – С. 120-123.
3. Никитин Е. Е. и др. Определение тепловых потерь в тепловых сетях по показаниям приборов учета тепловой энергии //Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2013. – №. 1. – С. 13-19.
4. Дмитриенко Р. И. и др. Повреждаемость и эффективность проведения гидравлических испытаний тепловых сетей города Киева // Техн. діагностика та неруйнівний контроль. – 2020. – №1. – с. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.01.04>
5. Малярченко В. А. и др. Централизованное теплоснабжение и энергосбережение в стратегии устойчивого развития крупных городов //Коммунальное хозяйство городов. – 2004. – №. 57. – С. 211-216.
6. ДСТУ-Н Б В.2.5-35:2007. Теплові мережі та мережі гарячого водопостачання з використанням попередньо теплоізованих трубопроводів. Настанова з проектування, монтажу, приймання та експлуатації //К.: Мінрегіон України. – 2008. – 94 с.
7. ДСТУ-Н Б В.2.5-81:2015. Настанова з проектування, будівництва та контролю якості теплових мереж з термостійких полімерних попередньо ізованих гнучких труб //К.: Мінрегіон України. – 2016. – 37 с.
8. Bhatia A. Overview of Insulation Materials // Continuing Education and Development Inc. New York. Retrieved April. – 2013. – Vol. 12. – 64p.
9. Jarfelt U., Ramnäs O. Thermal conductivity of polyurethane foam-best performance //10th International Symposium on district heating and cooling. – Chalmers University of Technology Goteborg, Sweden, 2006. – Pp. 3-5.
10. Mangs S. Insulation materials in district heating pipes: Environmental and thermal performance of polyethylene terephthalate and polyurethane foam. – Chalmers University of Technology, 2005. – 81p.
11. Test result of the district heating pipe systems manufactured by Isoplus Hohenberg (type Isopex 63,0/140) // Issued by the Department of Plastics Laboratory of Plastics Testing IMA Dresden. – 2014. - № B761/14.4. – 4p.
12. Lefter R. C., Popescu D. Analysis of “Conti” pre-insulated pipes with diffusion barrier versus traditional pre-insulated pipes used in district heating networks //2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. – IEEE, 2012. – Pp. 978-983
13. Roger Hwatz Pipe insulation // Seminar of BASF Polyurethanes Nordic AB. – 2018. – 17p.
14. Devyatkin E., Gvozdev I., Shalyapin S. Gas diffusion in heat insulated plastic pipe with inner and outer barrier layers// Plastic pipes. – 2016. – Pp. 36-38.
15. Olsson M. E. et al. Diffusion of cyclopentane in polyurethane foam at different temperatures and implications for district heating pipes //Journal of cellular plastics. – 2002. – Vol. 38. – №. 2. – Pp. 177-188.

APPLICATION OF MODERN PRE-INSULATED PIPES TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF CENTRALIZED HEAT SUPPLY SYSTEMS

Bozhko I.K.

*Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine,
2a, Marii Kapnist str., Kyiv, 03680, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2020.9>

The article is devoted to a review of manufacturing technologies and methods for counteracting the effects of aging and destruction of a ball of thermal insulation in previously insulated pipes (PIP) of heating networks. The thermophysical characteristics of various blowing agents are compared; the superiority of cyclopentane in both thermophysical and environmental parameters is shown.

The basic technologies for the production of pre-insulated pipe wires are considered. The advantages of «conti» technology using a diffusion barrier are highlighted. It is shown that for polyurethane foam, the main factor that suppresses heat transfer through PUR type thermal insulation is the low thermal conductivity of the gas mixture, which is "sealed" in the foam cells.

The analysis of the influence of "aging" of the heat-insulating shell, namely, the diffusion of oxygen molecules into the structure of polyurethane foam, is carried out, and its negative effect on the thermal characteristics of the heat-insulating material is shown. Oxygen diffusion leads to a gradual increase in the value of the coefficient of thermal conductivity of the heat-insulating shell, and as a result, increases heat loss by the pipeline. The results of predictive calculations confirmed the effectiveness of the use of diffusion barriers in the manufacture of PIP. It is shown that when using PIP with a diffusion barrier, unproductive heat energy losses decrease on average by 20–21%, which, in turn, leads to a decrease in the amount of payments to end consumers and an increase in the quality and efficiency of district heating systems.

It is also noted that polymer pre-insulated pipelines are practically not inferior in strength and reliability to steel PIP and at the same time, they have several advantages over steel PIP. It is recommended to increase the use of polymer PIP in the reconstruction of heating networks of the district heating system.

References 15, tables 2, figures 7.

Key words: thermal insulation, cyclopentane, diffusion, energy saving.

1. Zhovtyansky VA, Kulyk MM, Stogniy BS [Energy saving strategy in Ukraine: Analytical and reference materials Collective monograph in 2 volumes. Volume 1: General principles of energy saving]. Kyiv [Akadempriodi-ka]. 2006. V. 1. 510p. (Ukr.)

2. Taraday AM et al. [The main directions of modernization of heat supply systems to solve the problem of reducing natural gas consumption in Ukraine]. [Scientific Bulletin of Construction]. 2014. №. 3. Pp. 120-123. (Rus.)

3. Nikitin EE et al. [Determination of heat losses in thermal networks according to the readings of thermal energy meters]. [Energy technology and resource conservation]. 2013. №. 1. Pp. 13-19. (Rus.)

4. Dmitrienko RI, et al. [Damage and efficiency of hydraulic tests of thermal networks of the city of Kyiv]. [Technical diagnostics and non-destructive testing]. 2020. №1. Pp.37-44. DOI: <https://doi.org/10.37434/ttnk2020.01.04> (Rus.)

5. Malyarenko VA, et al. [Centralized heat supply and energy saving in the strategy of sustainable development of large cities]. [Municipal economy of cities]. 2004. №. 57. Pp. 211-216. (Rus.)

6. DSTU-N B B.2.5-35: 2007. [Heating networks and hot water supply networks using pre-heat insulated pipelines. Guidelines for design, installation, acceptance and operation] // Kyiv. [Ministry of Regional Development of Ukraine]. 2008. 94 p. (Ukr.)

7. DSTU-N B B.2.5-81: 2015. [Guidelines for the design, construction and quality control of thermal networks from heat-resistant polymer pre-insulated flexible pipes]. Kyiv [Ministry of Regional Development of Ukraine]. 2016. 37 p. (Ukr.)

8. Bhatia A. Overview of Insulation Materials. Continuing Education and Development Inc. New York. Retrieved April. 2013. Vol. 12. 64p.

9. Jarfelt U., Ramnäs O. Thermal conductivity of polyurethane foam-best performance. 10th International Symposium on district heating and cooling. Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden. 2006. P. 3-5.

10. Mangs S. Insulation materials in district heating pipes: Environmental and thermal performance of polyethylene terephthalate and polyurethane foam. Chalmers University of Technology. 2005. 81p.

11. Test result of the district heating pipe systems manufactured by Isoplus Hohenberg (type Isopex 63,0 / 140). Issued by the Department of Plastics Laboratory of Plastics Testing IMA Dresden. 2014. № B761 / 14.4. 4p. (Eng.)

12. *Lefter R. C., Popescu D.* Analysis of “Conti” pre-insulated pipes with diffusion barrier versus traditional pre-insulated pipes used in district heating networks. 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. [IEEE]. 2012. P. 978-983.

13. *Roger Hwatz* Pipe insulation. Seminar of BASF Polyurethanes Nordic AB. 2018. 17p.

14. *Devyatkin E., Gvozdev I., Shalyapin S.* Gas diffusion in heat insulated plastic pipe with inner and outer barrier layers. Plastic pipes. 2016. Pp. 36-38. (Eng.)

15. *Olsson M. E.* et al. Diffusion of cyclopentane in polyurethane foam at different temperatures and implications for district heating pipes. Journal of cellular plastics. 2002. Vol. 38(2). P. 177-188.

Отримано 06.07.2020

Received 06.07.2020