

ТОПЛИННО ПОВЕДЕНИЕ НА ТРЪБНИ ТОПЛОНОСИТЕЛИ С ТЪНКИ ТОПЛОИЗОЛАЦИОННИ ПОКРИТИЯ

Пенка Н. Златева^{1*}, Росица В. Петкова-Слипец² и Здравко Н. Петров³

¹ Технически университет-Варна,
кат. „Топлотехника”,
Варна, България

² ВСУ „Черноризец Храбър”,
кат. „Строителство на сгради и
съоръжения”, Варна, България

³ Технически университет-Варна,
кат. „Топлотехника”,
гр. Варна, България

РЕЗЮМЕ — Обект на изследване е влиянието на дебелината на различни по състав тънки топлоизолационни покрития върху топлинното поведение на тръбни (стоманени) топлоносители. Покритията са на основа акрилна смола, но с различни пълнители – керамични вакуумирани кухи микрокапсули и стъклени микросфери (балончета). Използвана е инфрачервена термография, за да се визуализира топлинния ефект при пренос на студен и горещ флуид. Резултатите са показателни за възможността с тънки слоеве да се постигне съществен топлосъхраняващ ефект. Установено е, че трислойните покрития с дебелина от 1,5-2 mm са по-ефективни от по-тънките такива. Максимален ефект от близо 25^oC разлика между температурата на топлоносителя и повърхността на покритието при пренос на горещ флуид се постига при използването на топлоизолационната смес с керамични вакуумни микросфери.

Ключови думи: инфрачервена термография, тънки топлоизолационни покрития, тръби, флуид

THERMAL BEHAVIOUR OF HEAT TRANSFER PIPES WITH THIN THERMAL INSULATION COATINGS

Penka N. Zlateva^{1*}, Rositsa V. Petkova-Slipets² and Zdravko N. Petrov³

¹ Technical University – Varna,
Department of Thermal Engineering,
Varna, Bulgaria

² Varna Free University “Chernorizets
Hrabar”, Department of Civil
Engineering, Varna, Bulgaria

³ Technical University – Varna,
Department of Thermal Engineering,
Varna, Bulgaria

ABSTRACT— The object of study is the influence of thickness of thin heat insulating coatings with different composition on thermal behaviour of heat transfer steel pipes. Coatings are on the basis of acrylic resin but with different fillers – ceramic hollow vacuum microcapsules and glass micro spheres (balloons). Infrared thermography was used to visualize the thermal effect during transportation of cold and hot fluid. The results are indicative for the possibility to achieve substantial heat reserve effect with thin layers. It was established that three layer coatings with thickness of 1,5-2 mm are more efficient than thinner one. The use of heat insulating mixture with ceramic vacuum microcapsules has as result a maximal effect of nearly 25^oC difference between temperatures of the heat transfer pipe and the coating surface during the transportation of hot fluid.

Keywords: infrared thermography, thin thermal insulation coatings, pipes, fluid

* Corresponding author at: Technical University - Varna Department of Thermal Engineering,
e-mail address: pzlateva1@abv.bg

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременните условия на глобализация, енергоефективността на тръбопроводните мрежи и тяхното топлоизолиране е една от важните задачи, свързани с енергийната ефективност. Необходимостта от решаването на този проблем се дължи предимно на ниските температури на околната среда през зимата в България (от около -2°C до -20°C), продължителността на отоплителния сезон (около 180 дни), горещините през лятото и лошото състояние на тръбопроводната мрежа.

Годишните загуби на енергия се дължат главно на загубата на топлина, лошото техническо състояние на топлоизолацията на тръбопроводите в тръбопроводната мрежа. Следователно, задачата за подобряване на топлоизолацията на тръбопроводите и оборудването на отоплителните системи е особено актуална.

През последните години на пазара се появяват нови топлоизолационни покрития, съдържащи в състава си керамични вакуумирани кухи микрокапсули или стъклени балончета и различни свързващи вещества. Топлинните свойства на тези тънки топлоизолационни покрития не са проучени достатъчно до момента (Zlateva, Petkova-Slipets, 2014). За да се определи ефективността на топлоизолацията за тръби и отоплителни системи е необходимо да се разработи достъпен и икономически ефективен метод за определяне на топлинното поведение на топлоносителя. То ще се определя не само от състава на топлоизолационното покритие, но и от различни технологични параметри основният от които е дебелината, респ. броя слоеве в които се нанася материала. За да се отчете реалното поведение на топлоносителя е необходимо да се използват образци с цилиндрична повърхност. Приложеният в настоящото изследване метод се основава на принципите на инфрачервена термография и цели чрез инфрачервена визуализация да се регистрират загуби, респ. съхранението на топлинна енергия и да се препоръчат дебелини на тънки топлоизолационни покрития с оглед постигане на оптимален тополосъхраняващ ефект.

Инфрачервената термография е една от съвременните, достъпни и достоверни нови технологии. Тя има редица предимства като бърз, безразрушителен и с висока точност на измерванията метод (Hellier, 2003). Използва се, за да измери температурата или температурната разлика на повърхностите. Фундаментален принцип на термодинамиката е, че топлинната енергия винаги „тече“ от по-топлата към по-студената област като топлопренасянето може да се извършва чрез топлопроводност (кондуктивен топлообмен), конвекция или топлинно излъчване (радиация) (Çengel, 2003).

Инфрачервената термография регистрира температурата, излъчена чрез радиация от повърхността на телата. Топлинното излъчване е разпространение на електромагнитни вълни с дължина $0,75 - 1000 \mu\text{m}$, които се подчиняват на законите на отражение, пречупване и поглъщане (Сандова, 2012; Русев, Златева, 2012).

Съвременната топовизионна техника използва инфрачервени детектори, работещи в два диапазона – с къси вълни ($3-5 \mu\text{m}$) и с дълги вълни ($8-14 \mu\text{m}$). Това е свързано с особеностите на пропускане на топлинно излъчване в атмосферата [8]. Именно в тези инфрачервени диапазони спактралният коефициент на отражение е минимален, следователно минимално е и влиянието на отразеното излъчване.

Количеството енергия, излъчено от повърхността на едно тяло зависи от няколко фактора, представени чрез закона на Стефан-Болцман (Hellier, 2003):

$$Q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4,$$

където Q – радиационен топлинен поток, W/m^2 ;

σ - константа на Стефан-Болцман, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

ε - коефициент на излъчване на повърхността;

T – абсолютна температура на повърхността, K .

Способността на телата да излъчват топлинна радиация се определя от характеристиките на повърхността им като грапавост и цвят. Колкото по-грапава и по-тъмна на цвят е една повърхност, толкова по-висока е излъчвателната ѝ способност.

Познаването на разпределението на топлинното излъчване от повърхността на контролирания обект се явява важен технически параметър при методите за топлинен контрол, тъй като то ни дава информация за процеса на топлопренасяне, за режима на работа, както и за наличието на скрити вътрешни дефекти.

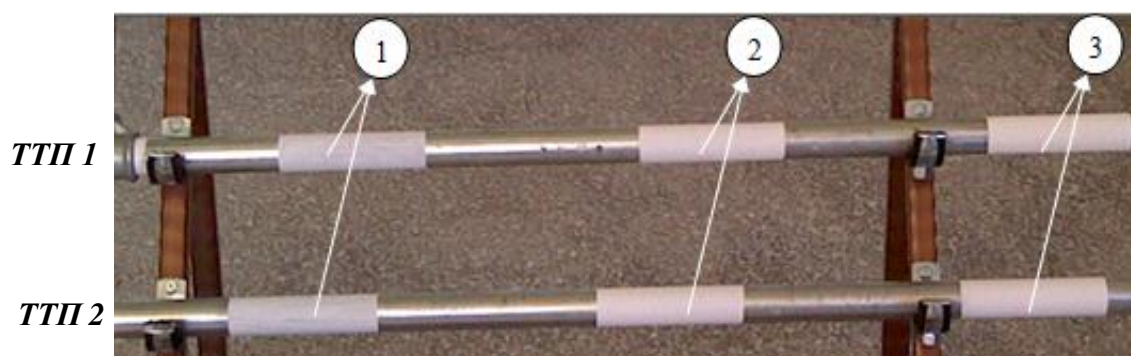
2. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

Предмет на изследване е влиянето на дебелината на слоевете на две различни по състав тънкослойни топлоизолационни покрития върху топлинното поведение на топлоносителя.

Тънкослойно топлоизолационно покритие 1 (ТПП1) представлява течен дисперсионен разтвор от чиста акрилна смола, около 60% керамични вакуумирани микрокапсули с висока степен на разреждане, специални нискоизлъчващи (Low-e) компоненти и екологични противоплесенни добавки.

Тънкослойно топлоизолационно покритие 2 (ТПП2) представлява течен дисперсионен разтвор от чиста акрилна смола с множество стъклени микросфери (балончета), съдържащи въздух.

Двете тънкослойни топлоизолационни покрития са нанесени в един, два и три слоя на определено разстояние един от друг върху стандартни поцинковани стоманени тръби 3/4" [14]. По време на експерименталното изследване всяка от тръбите е съединена към тръбопроводната мрежа за студена и топла вода, фиг.1.



Фиг.1 Експериментална установка

- 1 - еднослойно покритие от ТПП1 с дебелина 0,5 mm и от ТПП2 с дебелина 0,7 mm;
2 – двуслойно покритие от ТПП1 с дебелина 1,0 mm и от ТПП2 с дебелина 1,4 mm;
3 – трислойно покритие от ТПП1 с дебелина 1,5 mm и от ТПП2 с дебелина 2,0 mm.

Топлинното поведение на тънкослойните топлоизолационни покрития, използвани в тръбопроводните системи за топлоснабдяване е проследено с термовизионна камера FLIR E60bx със следните характеристики [9]:

- **диапазон на измерваните температури:** от -20°C до $+120^{\circ}\text{C}$
- **диапазон на работната температура:** от -20°C до $+30^{\circ}\text{C}$
- **температурна чувствителност (NETD):** $\leq 0,045^{\circ}\text{C}$ при $T=+30^{\circ}\text{C}$
- **геометрична разделителна способност (IFOV):** 1,36 mrad
- **IR резолюция на детектора:** 320x240 пиксела
- **спектрален диапазон:** от $7,5\mu\text{m}$ до $13\mu\text{m}$
- **точност на измерването:** $\pm 2\%$ от измерваната стойност
- **регулиране на коефициента на излъчване ε .**

Обработката на инфрачервените изображения е извършена със специализиран софтуер FLIR TOOLS+.

Инфрачервеният контрол е извършена съгласно изискванията на ISO 18434-1:2008, ISO 10878:2013 и ASTM E 1934-99a (2010).

За измерване на температурата се използва и контактен термометър с термодвойка тип К (NiCrNi) и измервателен обхват от 0^oC до 1000^oC, чувствителност 0,1^oC и точност ±1%.

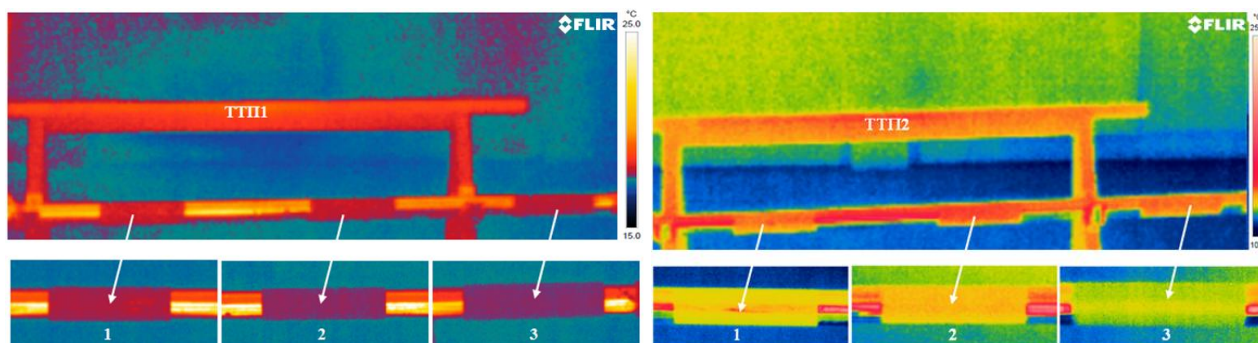
Измерванията са направени при следните условия:

- без флуид в топлоносителя при температура на околната среда T=25^oC;
- със студен флуид с температура T=20^oC (студена вода в тръбата) и температура на околната среда T=25^oC;
- с горещ флуид с температура T=65^oC (гореща вода в тръбата) и температура на околната среда T=25^oC.

3. РЕЗУЛТАТИ

Резултатите за топлинното поведение на ТТП1 и ТТП2, получени чрез инфрачервена термография са представени на фиг. 2, фиг.3 и фиг.5.

Изходната позиция на изследването е при темперирани на стайна температура тръби. Инфрачервените снимки са представени на фиг. 2.



Фиг.2 Инфрачервена термография на тръби с ТТП1 (а) и ТТП2 (б) без флуид

Инфрачервената визуализация показва по-топли зони за металната тръба и по-студени зони – за местата с топлоизолационни покрития. Този факт може да се обясни със следните аргументи.

1. Обект на изследване са материали от разнороден характер с различна топлопроводност, качество на повърхнината и съответно с различна емисионна и отражателна способност. Поцинкованите стоманени тръби са с гладка блестяща повърхност, която действа като топлинно огледало с много добра рефлекторна способност. Зоните с топлоизолационни покрития са с грапава повърхност, което определя и тяхната по-слаба отражателна способност. При едни и същи топлинни условия много добрите отражателни повърхности скриват тяхната истинска топлинна природа чрез отражение на основата и емитиране на много малко от тяхната същинска термична енергия (Hellier, 2003).

2. Степента на чернота (коефициента на излъчване) ϵ на изследваните материали е много различна. Поцинкованата стомана е с коефициент на излъчване $\epsilon=0,28-0,29$ [8, 10], а топлоизолационните покрития – с $\epsilon=0,79-0,84$ [8, 10]

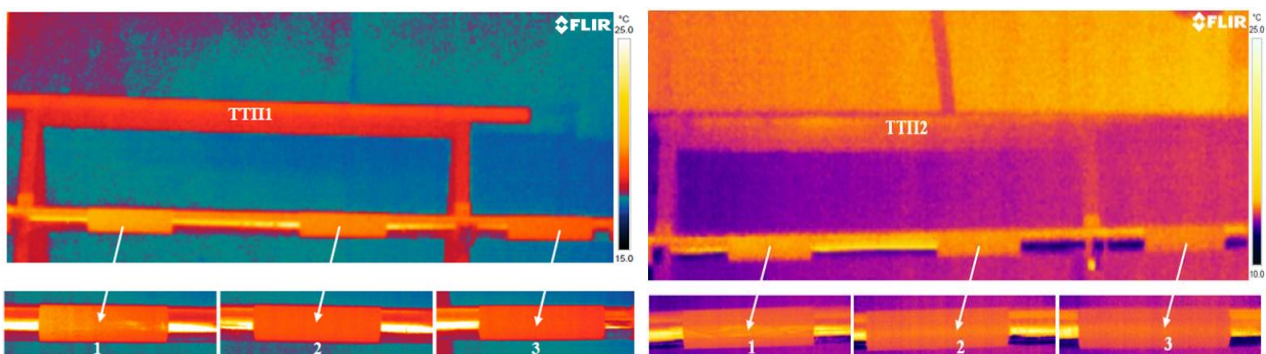
3. Изследваните повърхности са цилиндрични, което предизвиква смущения от отражение (рефлексия) на емитирания толинен поток (Endo, 2015). Поради това на инфрачервените снимки металните повърхности не са с еднаква температура. В зависимост от ъгъла на

заснемане регистрираме и различно положение на по-топлиите, респ. по-студени зони по повърхността на металните тръби.

Следователно, при едни и същи условия на топлинно въздействие и инфрачервено заснемане винаги стоманените тръби ще се „виждат“ по-студени от топлоизолационните покрития. Тъй като обект на настоящото изследване са основно топлоизолационните покрития, то инфрачервената топовизия е извършена като е взет за основен коефициента на излъчване на покритието. Всички топовизионни снимки са направени с $\varepsilon=0,79$.

Съгласно изискванията за безразрушителен термовизионен контрол не се препоръчва измерване на температурата при коефициента на излъчване по-нисък от $\varepsilon=0,50$ (Hellier, 2003). Поради това, реалната температура е измерена с контактен термометър. Във всички изследвани зони температурата е 26°C .

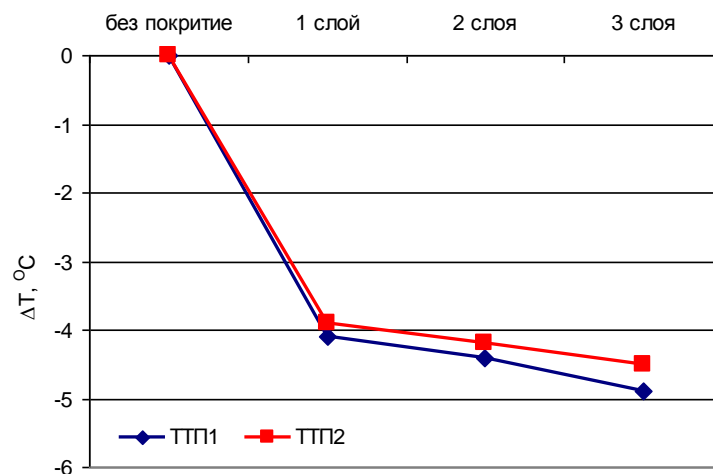
Резултатите от изследването със студен флуид с температура $T=20^{\circ}\text{C}$ (студена вода в тръбата) са представени на фиг. 3



Фиг.3 Инфрачервена термография на ТТП1(а) и ТТП2(б) със студен флуид

Поради липсата на съществена температурна разлика между тръбата със студен флуид и околната среда по изследваната повърхност не може да се формира температурно поле, което да бъде регистрирано от инфрачервената камера. Качественият и количественият контрол чрез инфрачервена топовизия в този случай не е на необходимото ниво.

Измерените чрез контактен термометър температури в различните зони при въздействие със студен флуид – вода с $T=20^{\circ}\text{C}$, са представени в табл.1. Температурният ефект от използването на тънки топлоизолационни покрития е показан на фиг. 4.



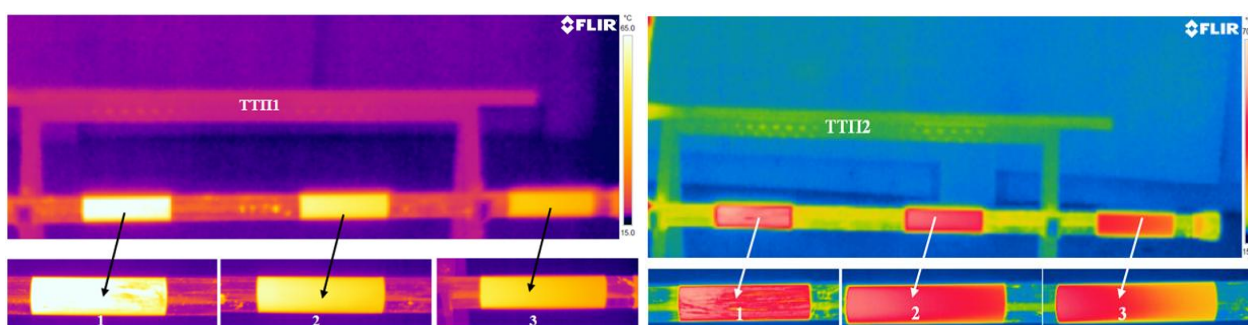
Фиг. 4 Температурен ефект от различните слоеве тънки топлоизолационни покрития ТТП1 и ТТП2 при въздействие със студен флуид

Таблица 1 Температури на топлоизолационните покрития при тръба със студен флуид

Вид покритие	1 слой	2 слоя	3 слоя
ТПП1	20,9°C	20,6°C	20,1°C
ТПП2	21,1°C	20,8°C	20,5°C

Данните показват, че при използването на 3-слоенно покритие се постига по-добър ефект от гледна точка на топлинно съхранение. Използването на топлоизолационно покритие с керамични вакуумирани кухи микрокапсули (ТПП1) е по-ефективно в сравнение с топлоизолационно покритие със стъклени микросфери (балончета), съдържащи въздух (ТПП2).

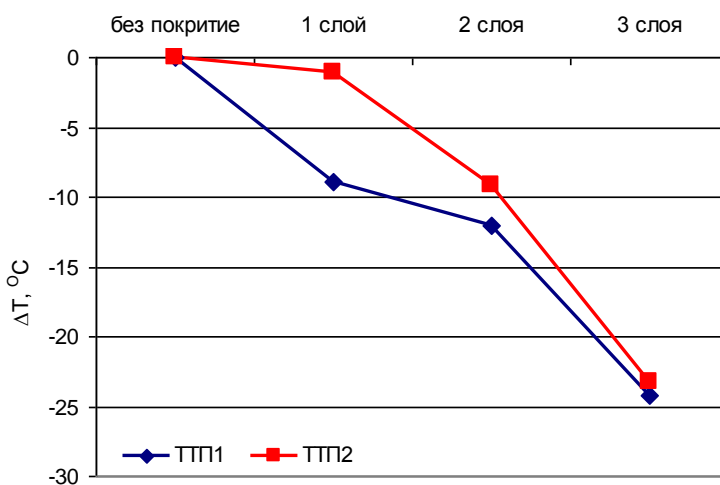
Резултатите от изследването с горещ флуид с температура $T=65^{\circ}\text{C}$ (гореща вода в тръбата) са представени на фиг. 5.



Фиг.5 Инфрачервена термография на ТПП1 (а) и ТПП2 (б) с горещ флуид

В този случай инфрачервената топовизия ясно показва топлинния ефект от различните видове покрития и различния брой нанесени слоеве. Причината е, че е наличен температурен напор ΔT от 40°C , което обуславя формирането на топлинно поле около изследваните повърхности. Качественият и количественият анализ позволяват да се направи оценка на поведението на тънките топлоизолационни покрития.

Измерените чрез инфрачервената камера температури в различните зони при въздействие с горещ флуид – вода с $T=65^{\circ}\text{C}$, са представени в табл.2. Те са аналогични на измерените с контактен термометър като е направена корекция със зададения коефициент на емисия. Температурният ефект от използването на тънки топлоизолационни покрития е показан на фиг. 6.



фиг. 6 Температурен ефект от различните слоеве тънки топлоизолационни покрития ТПП1 и ТПП2 при въздействие с горещ флуид

Таблица 2 Температури на топлоизолационните покрития при тръба с горещ флуид

Вид покритие	1 слой		2 слоя		3 слоя	
	Измерване с IR камера	Измерване с контакт. термометър	Измерване с IR камера	Измерване с контакт. термометър	Измерване с IR камера	Измерване с контакт. термометър
ТТП1	52,9 ⁰ С	56,1 ⁰ С	49,9 ⁰ С	52,9 ⁰ С	38,5 ⁰ С	40,8 ⁰ С
ТТП2	60,3 ⁰ С	63,9 ⁰ С	52,7 ⁰ С	55,8 ⁰ С	39,3 ⁰ С	41,7 ⁰ С

Анализът на резултатите показва, че при по-висока температурна разлика между топлоносителя и околната среда се постига по-съществен топлинен ефект при използването на тънките топлоизолационни покрития. В този случай, се регистрира температурна разлика между повърхността на покритието и повърхността на топлоносителя от около 10⁰С при двуслойно покритие до над 20⁰С при трислойно покритие.

При използването на 3-слойно покритие се постига по-добър ефект от гледна точка на топлинно съхранение.

Еднослойно покритие от топлоизолационна смес със стъклени микросфери (ТТП2) практически не оказва ефект върху топлосъхранението на стоманената тръба при пренос на горещ флуид. При същите условия, еднослойното покритие от топлоизолационна смес с керамични микрокапсули (ТТП1) съществено повлиява топлинното поведение на топлоносителя.

Използването на топлоизолационно покритие с керамични вакуумирани кухи микрокапсули (ТТП1) отново е по-ефективно в сравнение с топлоизолационно покритие със стъклени микросфери, съдържащи въздух (ТТП2).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основните изводи от проведеното изследване могат да се систематизират, както следва:

- използването на тънки топлоизолационни покрития върху тръбни топлоносители оказва влияние върху топлинното им поведение при преноса на студени и горещи флуиди;

- оценката на ефективността на тънките топлоизолационни покрития може да се извърши с достатъчна точност чрез използването на инфрачервена топовизия;

- при използването на тънки топлоизолационни покрития със съдържание на керамични вакуумирани кухи микрокапсули се постига температурен ефект от 4-5⁰С при преноса на студен флуид и от 10-25⁰С – при горещ флуид. По-силен е ефекта при покритие от 3 слоя.

- при използването на тънки топлоизолационни покрития със съдържание на стъклени микросфери (балончета), съдържащи въздух се постига температурен ефект от 4-4,5⁰С при преноса на студен флуид и от 2-23⁰С – при горещ флуид. По-силен е ефекта при покритие от 3 слоя. При еднослойно покритие практически не се повлиява топлинното поведение на топлоносителя.

Представените по-горе изводи за влиянието на различните по състав и дебелина топлоизолационни покрития върху топлинното поведение на тръбни стоманени топлоносители са показателни за възможността дори и с тънки слоеве (с дебелина по-малка от 2 mm) да се постигане съществен топлосъхраняващ ефект.

5. ЛИТЕРАТУРА

1. Zlateva P., Petkova-Slipets R. (2014). Study of thermal insulating coating AKTERM behavior using an infrared thermography. CAx technologies, 2, 30-33
2. Hellier, C.J. (2003). Handbook of Nondestructive Evaluation. McGRAW-HILL
3. Çengel, Y. A. (2003). Heat Transfer: A Practical Approach. McGraw-Hill
4. Сандова, М. (2012). Процеси и апарати в химическата промишленост. Бургас
5. Русев, Д., Златева П. (2012). Топлотехника, Геа – Принт, Варна
6. РД 13-04-2006 Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах
7. ISO 18434-1:2008 Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography - Part 1: General procedures
8. Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования, ОРГРЭС, Москва, 2000, стр. 82
9. FLIR E Series bx
http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_USA/Products/Product_Literature/flir-e-series-bx-datasheet.pdf
10. Table of Emissivity of Various Surfaces for Infrared Thermometry, MIKRON http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf
11. Endo, H., Kusaka, T. (2015). Efficient Inspection for Gas Pipes by Infrared Thermography. Kobelco Technology Review, 33, 50-55
12. ISO 10878:2013 Non-destructive testing -- Infrared thermography -- Vocabulary
13. ASTM E 1934-99A (2014) Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography
14. БДС EN 10204/2.2, CE маркировка, Метални продукти. Горещовалцувани профили – кръгли пръти от конструкционни стомани.