



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ – СЛИВЕН
Катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“

маг. инж. Стефан Василев Калчев

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОПЛИНИ ЗАГУБИ НА ТОПЛПРОВОДИ
С ПОМОЩТА НА ТЕРМОВИЗИОННИ СРЕДСТВА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
„ДОКТОР“

Област: 5. Технически науки
Професионално направление: 5.4 Енергетика
Научна специалност: Теоретична топлотехника

Научни ръководители: **проф. д-р инж. Петър Костов**
доц. д-р инж. Койчо Атанасов

СЛИВЕН, 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ към Инженерно-педагогически факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 10.06.2019 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 27.09.2019 г. от 15,00 часа в зала № 1207 на Инженерно-педагогически факултет - Сливен на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.4-14/19.06.2019 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р инж. Петър Костов;
2. проф. д.т.н. инж. Иван Антонов;
3. доц. д-р инж. Невен Кръстев;
4. доц. д-р инж. Даниела Чакърова;
5. доц. д-р инж. Атанас Мирчев.

Рецензенти:

1. проф. д.т.н. Иван Антонов;
2. доц. д-р Невен Кръстев.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в Учебен отдел на Инженерно-педагогически факултет - Сливен на ТУ – София, блок № 2, кабинет 200.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ на Инженерно-педагогически факултет – Сливен на ТУ-София. Междинни резултати от дисертационния труд са докладвани на научни форуми и конференции и са публикувани в периодичния специализиран печат.

Автор: маг. инж. Стефан Калчев

Заглавие: ***Изследване на топлинните загуби от топлопроводни с помощта на термовизионни средства***

Тираж: 30 броя

Отпечатано в

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Дисертацията касае проблематика свързана с определянето на топлинните загуби в промишлени паропроводи. В този смисъл разглежданите въпроси имат пряко отношение към енергийната ефективност на промишлените предприятия. За постигане целта на дисертационния труд и решаването на произтичащите от темата конкретни топлотехнически задачи се предлага да се използва многопикселна термовизионна система в качеството на съвременно измервателно средство. Разработения софтуерен продукт има универсален интерфейс, и е приложим практически във всяко предприятие използващо водна пара като топлоносител. В този смисъл актуалността на разглежданата проблематика не буди съмнение.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта е да се създаде метод при който, с помощта на термовизионна камера да се определят общите загуби при преноса на топлина в промишлен паропровод, като сума от загубите в отделните конструктивните елементи.

За реализиране на целта на изследването е необходимо да се решат следните задачи:

1. Да се изследват загубите на топлина в цилиндричните части на паропровода, с отчитане възможностите на термовизионната апаратура, като измервателно средство и местните метеорологични особености
2. Да се изследват загубите в статичните опори
3. На базата теорията на топлообмена да се определят загубите на топлина в колената.
4. На базата на справочни данни да се систематизират загубите в спирателната арматура.
5. Да се създаде приложно ориентиран софтуер за определяне на топлинните загуби в промишлени паропроводи чрез използване на термовизионна апаратура

Научна новост

1. Предложен е нов метод за намирането на топлинните загуби на целия паропровод както и на отделни участъци от него.

С нормативно регламентирания "енталпиен метод" се определят топлинните загуби само на целия тръбопровод и не е възможно сегментирането и определянето им на отделни участъци от него. Новия метод се състои в определянето на топлинните загуби през отделните конструктивните елементи на паропровода – цилиндрична част, колена, арматури и статичните опори и сумирането им за целия паропровод или отделни части от него. Не е известно прилагането му досега, поради невъзможността да се измери без многопикселна термовизионна система усреднена за целия паропровод повърхностна температура, както и затрудненията да се реши еднозначно топлотехническата задача за топлопредаването през статичните опори.

2. Структурирано е и успешно е решено, критериално уравнение, чрез което може да се определи топлопредаването от пространствени тела със сложна конфигурация каквито са статичните опори на паропроводите.

Решаването на уравнението на топлопроводността по трите координатни оси е сложна математическа задача решението на която, е съпроводено със значителни математически трудности. Ако се пренебрегне радиационния топлообмен, по аналогия тази задача може да се сведе до случай на конвективен топлообмен в ограничено ребро, но не е известно аналитично решение. Затрудненията произтичат от следните причини:

- наличието на топлоизолация която, обхваща цилиндричен сегмент, чрез който опората чрез заварка е закрепена към външната повърхност на тръбопровода;
- конфигурацията на опората която, дори и в един паропровод може да има различно конструктивно изпълнение.
- нееднаквите условия на обтичане на образуващите опората плоскости при наличие на вятър който, освен това във времето е различно ориентиран.

В конкретния случай критериалното уравнение е получено на база на анализ на размерностите след серия експерименти със специално конструиран лабораторен стенд.

Практическа приложимост

Софтуерния продукт с новата методика е с универсална приложимост.

Апробация

Междинни резултати от дисертационния труд са докладвани на научни форуми и конференции и са публикувани в периодичния специализиран печат.

Софтуерния продукт с новата методика се използват от Топлотехническата Лаборатория на “Лукойл Нефтохим Бургас“ като допълнение на енталпийния метод.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 8 броя научни статии, от които 1 брой самостоятелна и в периодичния специализиран печат.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 164 страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо (140) литературни източници, като (70) са на латиница и (60) на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо (64) фигури и (18) таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ОБЗОР ПО ПРОБЛЕМА

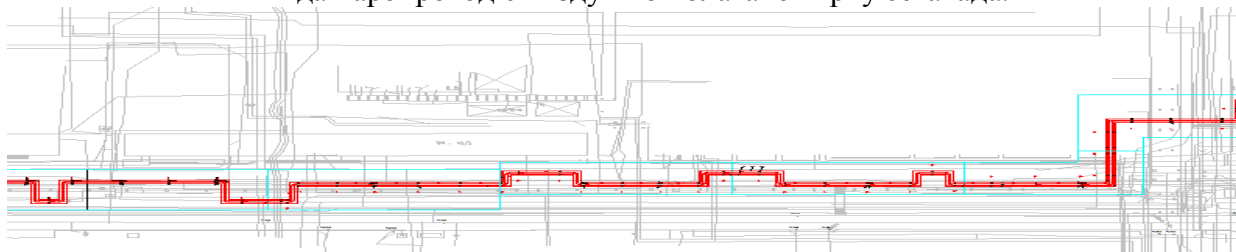
В дисертационния труд са разгледани 140 литературни източника групирани в пет тематични групи. В първата група са залегнали публикации засягащи въпросите свързани с топлинните загуби. Обърнато е особено внимание на т.нар „енталпиен метод“ разглеждащ топлинните загуби като разлика в енталпията на топлоносителя в началото и края на паропровода. Посочена е нормативната база регламентираща използването му. Във втората група са разгледани статии и монографии имащи отношение към оптико–електронните прибори в качеството им на дистанционни пирометри. Засегнати са публикации относно конструктивната им реализация както, и факторите които, влияят на точността на измерването. В третата група попадат публикации разглеждащи приложението на многопикселните термовизионни системи в различни технически направления. Обърнато е внимание на широкото им разпространение като диагностично средство. В четвъртата група са разгледани теоретичните и практическите аспекти при провеждане на топлотехнически експерименти. Разгледани са няколко статии и монографии касаещи ортогоналното планиране на експериментите. Петата група са самостоятелни или в съавторство публикации на автора имащи пряко отношение към дисертационния труд. Изводите които, могат да се направят от литературния обзор са следните:

1. Топлинните загуби в паропроводи имат съществена икономическа стойност и работата по тяхното намаляване е перспективна и оправдана.
2. В практиката, като нормативно утвърден метод за определяне на топлинните загуби при преноса на топлина във промишлени паропроводи се използва енталпийния метод. Той е относително точен, но не е в състояние да предостави информация за загубите в различните участъци на паропровода.
3. В литературния обзор не бяха открити формули за аналитично определяне на местните топлинните загуби през статичните опори. Вероятно това се дължи на голямото конструктивно разнообразие при което аналитичния подход е затруднен от невъзможността коректно да бъдат зададени началните и гранични условия. В справочната литература е налична информация за топлинните загуби за различните видове спирателна арматура в зависимост от размера и работното налягане.
4. Термографията, като нов метод за определяне на повърхностни температури на твърди тела е относително лесно достъпен, и е в състояние бързо и достатъчно точно усреднена температура на заснетия участък, което от своя страна позволява да бъде определени топлинните загуби през различните елементи на паропровода.
5. При работа с оптико-електронна апаратура, от съществено значение е да се определи степента на чернота на измервания обект, и да се минимизират другите фактори които влияят на точността на измерването.
6. Изглежда напълно осъществимо на базата на термовизионните измервания да се разработи метод за съвместна (качествена и количествена) оценка на топлинните загуби в магистралните паропроводи. За целта, след изясняване на разпределението на температурата по цилиндричната част на паропровода и елементите му, със помощта на аналитичната теория на топлообмен и провеждане на експериментални изследвания, е възможно да бъдат структурирани удобни за практическо приложение математически зависимости за определяне на топлинния поток през отделните конструктивните елементи на паропровода, с цел общите топлинни загуби да бъдат представени като алгебрична сума от тях.
7. Реалистична е възможността да се изготви приложен софтуер, чрез който на основата на резултатите от термовизионните измервания, да се получават в реално време резултати за топлинните загуби в отделните негови сегменти и в крайна сметка чрез сумиране да се определят на общите топлинни загуби за целия паропровод.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ НА ОБЗОРА И ИЗГОТВЯНЕ НА КЛАСИФИКАЦИЯ

2.1. Въведение

На Фиг.1 е показан част от генералния план на промишлено предприятие на който се вижда паропровод с въздушно полагане върху естакада.

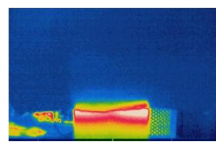


Фиг.1 Промислен паропровод върху естакада

Характерните конструктивни елементи на паропровода - опора, арматура и коляно са представени като фотографии във видимия и инфрачервения спектър на Фиг. 25-28



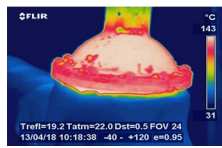
Фиг. 25 Статична опора



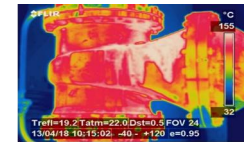
Фиг. 26 Неизолирана арматура



Фиг. 27 Изолирана арматура



Фиг. 28 Коляно



Съгласно поставената цел на дисертационния труд, общите топлинни загуби са представени като алгебрична сума от топлинните загуби през отделните конструктивни елементи на паропровода

$$\sum Q = Q_{\text{лин}} + Q_{\text{кол}} + Q_{\text{оп}} + Q_{\text{ар}} \quad (39)$$

$$\text{където: } Q_{\text{лин}} = \sum_{i=1}^n [\pi D_{\text{ои}} (\alpha_{ki} + \alpha_{ri}) (T_{\text{ои}} - T_o)] L_i \quad (40)$$

са топлинните загуби в праволинейните участъци на паропровод [W]

като: n е броя на праволинейните сегменти на паропровода;

L_i е дължината на i -тия праволинеен сегмент [m];

$D_{\text{ои}}$ е диаметъра на i -тия праволинеен сегмент [m];

$T_{\text{ои}}$ е температурата на i -тия праволинеен сегмент [K];

T_o е температурата на околната среда;

α_{ki} е коефициент на топлопредаване чрез конвекция на i -тия праволинеен сегмент. Определя се по критериалното уравнение (16) $[\frac{W}{m^2 K}]$. За целта трябва да се определят по опитен път за конкретните условия безразмерния множител C_2 и степенния показател m , в зависимост от скоростта и посоката на вятъра;

α_{ri} е коефициент на топлопредаване чрез излъчване на i -тия праволинеен сегмент. Определя се по формула (14) $[\frac{W}{m^2 K^4}]$.

Топлинните загуби [W] в колената на паропровода са:

$$Q_{\text{кол}} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^m \left[\pi D_{\text{оу}} (\alpha_{kj} + \alpha_{rj}) \left(1 - 1,77 \frac{D_{\text{оу}}}{R_j} \right) (T_{\text{оу}} - T_o) \right] \quad (41)$$

като: m е броя на колената на паропровода

$D_{\text{оу}}$ е диаметъра на j -тото коляно [m]

R_j е радиуса на огъване j -тото коляно [m]

$T_{\text{оу}}$ е температурата на повърхността на j -тото коляно [K]

Топлинните загуби [W] в статичните опори на паропровода са

$$Q_{\text{оп}} = \sum_{q=1}^g q_{\text{оп}q} \quad (42)$$

като: g е броя на топлинните мостове в опорите на паропровода

$q_{\text{оп}q}$ са загубите на топлина през q -тата статична опора [W]

Топлинните загуби [W] в арматурата са

$$Q_{ap} = \sum_{k=1}^p q_{ap\ k} \quad (43)$$

като: p е броя на арматурите на паропровода

$q_{ap\ k}$ са загубите на топлина от k -тата арматура [W]

Следователно Уравнение (39) може да се представи по следния начин:

$$\sum Q = \sum_{i=1}^n [\pi D_{ou\ i} (\alpha_{ki} + \alpha_{ri}) (T_{ou\ i} - T_0)] L_i + \frac{1}{4} \sum_{j=1}^m \left[\pi D_{ou\ j} (\alpha_{ki} + \alpha_{ri}) \left(1 - 1.77 \frac{L_{ou\ j}}{R_j} \right) (T_{ou\ i} - T_0) \right] + \sum_{q=1}^j q_{оп\ q} + \sum_{k=1}^p q_{ap\ k} \quad (44)$$

Уравнение (44) позволява да се определят и сумират топлинните загуби през отделните конструктивни елементи на паропровода-цилиндрична повърхност, колена, статични опори, арматура и прочие. Представени по такъв начин, общите загуби изискват повече време и усилия за определянето им, но е на лице съществено предимство в сравнение с „енталпийният” метод - ясно се детерминират загубите в различните конструктивни елементи на топлопровода и съответно могат да се предприемат конкретни мерки за намаляването им. Инженерно предизвикателство е да се разработи метод за съвместна (качествена и количествена) оценка на топлинните загуби в магистралните паропроводи. Този образно казано “метод на обратния баланс” позволява да се структурира удобен за практически нужди програмен продукт за експресни оценки на текущите загуби в реално време.

Дисертационния труд може да постигне своята цел само ако се намери удовлетворително решение на произтичащите от нея задачи както следва:

1. Определяне на линейните загуби през външната цилиндрична повърхнина $Q_{лин}$ съгласно уравнение (40). За целта е необходим експеримент за определяне по опитен път функционалната зависимост на спектралната излъчвателна способност $\varepsilon_{(\lambda, T)}$ от температурата на обекта в дълговълновия обхват на инфрачервения спектър и коефициента $\varepsilon_{(\beta)}$ за компенсиране грешките произтичащи от позиционирането на обектива под ъгъл спрямо фронталната директория към обекта.

2. Определяне на топлинните загуби през колената $Q_{кол}$ съгласно уравнение (41). След като са определени α_{ki} и α_{ri} за прилежащите към коляното цилиндрични участъци, загубите в коляното могат да се определят аналитично и специален експеримент не е нужен.

3. Определяне на топлинните загуби през статичните опори $Q_{оп}$. Необходимо е да се потърси подходящ математичен модел за определянето на топлинните загуби през тях. Валидността на такъв модел може да се докаже само по експериментален път.

4 Определяне на топлинните загуби през арматурите Q_{ap} . Тези загуби ще се добавят като константна стойност на базата на справочни данни [048, 047, 050, 122].

Валидиране на новия метод като, топлинните загуби определени чрез "обратния баланс", се съпоставят със загубите определени по "енталпийния" метод. За целта е проведен промишлен експеримент на реално действащи паропроводи. Всички резултати от експериментите задължително се подлагат на статистически анализ. За целите на корелационната и регресионната статистика е използван метода на най-малките квадрати. Този метод, както е известно [131], се основава на уравнението

$$SUM = \sum_1^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 = \min \quad (45)$$

където: y_{ij} е експериментално полученото значение за всеки j -ти пореден опит във всяка i -та точка ограничаваща областта на решенията

$\bar{y}_i$ е средно аритметичното значение на търсената величина за серията опити в i -тата точка.

При тази постановка е необходимо да се проведат три експеримента

1. Да се определи дали и при какви условия измерената чрез термовизионната система температура съответства на термодинамичната температура установена от топлинното равновесие. Експеримента се налага вследствие множеството условности относно точността на оптико–електронната измервателна техника отбелязани в литературния обзор

2. Да се определи топлинния поток и да се структурира математичен модел описващ топлообмена с околната среда на сложно пространствено тяло, каквото е опората на паропровода

3. Да се валидира предложени нов метод за определяне на топлинните загуби, като се съпостави с нормативно регламентирания „енталпиен метод“ в реални промишлени условия на действащи паропроводи.

ГЛАВА 3.

3.1. Експеримент за определяне по опитен път функционална зависимост на спектралната излъчвателна способност $\varepsilon(\lambda, T)$ от температурата на обекта в инфрачервения спектър и коефициента $\varepsilon(\beta)$ за компенсиране грешките произтичащи от позиционирането на обектива под ъгъл спрямо фронталната директория към обекта при измерване с термовизионна камера

3.1.1 Цел и задачи на експеримента

Целите и задачите поставени в конкретния експеримент произтичат от генералните цели и задачи формулирани в глава I. В този аспект целта на този експеримент е да се определи достоверността на измерванията на повърхностната температура на паропровод по радиометричен начин чрез термовизионна апаратура.

Съпътстващи задачи са:

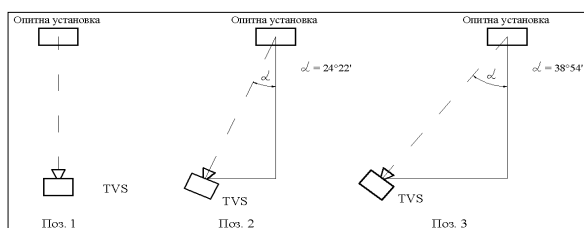
1 Да се определи по опитен път функционална зависимост на спектралната излъчвателна способност $\varepsilon(\lambda, T)$ от температурата на обекта в инфрачервения спектър.

2 Да се определи коефициент за компенсиране грешките произтичащи от позиционирането на обектива под ъгъл спрямо фронталната директория към обекта $\varepsilon(\beta)$

3.1.2. Методология на експеримента

Същността на експеримента се състои в определянето на температурата в изследваните зони от повърхността на специално разработени лабораторни образци по радиометричен начин чрез стандартна термовизионна апаратура работеща в дълговълновия обхват и сравнение на резултатите с еталонни измервания.[133] При фиксирана дължина на вълната на която, работи термовизионната камера, оператора задава на прибора различни стойности на степента на чернота на обекта, а както е известно, съгласно закона на **Kirchhoff**, степента на чернота на твърдите тела съвпада със спектралната им излъчвателна способност. Така, при съвпадение на измерваната температура с еталонната, еднозначно се определя стойността на $\varepsilon(\lambda, T)$. Аналогични измервания при различни температури на обекта, позволяват да се определи графично функционална зависимост $\varepsilon(\lambda, T) = f(T)$. След като степента на чернота респективно спектралната излъчвателна способност е определена еднозначно, може да се изчисли относителната грешка която се получава при измерването с термовизионната апаратура,

ако обектива се позиционира под ъгъл β спрямо нормалата. За целта са извършени сравнителни измервания в три позиции както е показано на Фиг.31.



Фиг. 31. Схема на разположение на термовизионната камера при различните измервания

Достоверността и възпроизводимостта на резултатите се проверяват посредством статистически анализ. За този експеримент е удобен линеен регресионен модел. Като критерий за адекватност на линейните регресионни модели е целесъобразно да се приложи R^2 – критерия на **Pirson**. За целта е използвана стандартна статистическа функция **Adjusted R Square** в Excel,

3.1.3. Характеристика на средствата за измерване

Използвана е многопикселна термовизионна система **Therma Cam P60** производство на фирмата **FLIR SYSTEMS**. Технически параметри съгласно спецификацията на производителя [073] са посочени подробно в дисертационния труд на стр. 76.

3.1.4. Валидиране на резултатите

3.2. Изследване на топлинните загуби в опори

3.2.1. Цел и задачи

Основната цел която, се поставя в този експеримент е да се създаде достоверен математически модел за определяне на топлинните загуби през опорите, като необходим етап от реализацията на новия метод за определяне на топлинните загуби е невъзможен.

3.2.2. Методология на експеримента

Подвижните и неподвижните опори на тръбопроводите са сложни пространствени тела. Решаването на уравнението на топлопроводността по трите координатни оси е сложна математическа задача решението на която, е съпроводено със значителни математически трудности. Когато диференциалните уравнения са неизвестни или трудно решими (какъвто е настоящия случай), единствения начин за изучаване на явлението е провеждането на експеримент. Резултатите от експеримента съгласно теорията на подобие е целесъобразно да се представят в обобщена форма във вид на критериално уравнение което, да включва критериите на подобие които, характеризират явлението. Такъв подход е приложен и в конкретния случай.[137] Функционална зависимост на участващите в експеримента величини е от вида:

$$Q = f(\alpha_{оп}, \lambda, \delta, F, T_{mp}, \Delta T) \quad (61)$$

където: Q е количеството топлина отдадено чрез околната повърхност на опората за единици време[W]

$\alpha_{оп}$ е коефициента на топлопредаване от опората към околния въздух $[\frac{W}{m^2 K}]$

λ е коефициента на топлопроводност на материала на опората $[\frac{W}{mK}]$

δ е дебелината на опората[m]

F е повърхността на опората[m²]

T_{mp} е температурата на стената на топлопровода от страната на топлоносителя[K].

Поради интензивния пренос на топлина от парата към стените на паропровода тя е практически равна на температурата на насищане на парата за съответното налягане $\Delta T = T_w - T_0$ е температурната разлика между температурите на стената на неизолираната част на опората (T_w) и околния въздух (T_0)[K]

Функционалната зависимост (61) може да се представи като степенна функция от вида:

$$q_{оп} = c \alpha_{оп}^a \lambda^b \delta^c F^d T_{mp}^e \Delta T^f \quad (62)$$

където c е коефициент на пропорционалност, а f, e, d, c, b и a са степенни

показатели на различните определящи величини. Уравнение (62) представено със съответните размерности на величините добива вида:

$$js^{-1} = (m^{-2}js^{-1}K^{-1})^a(m^{-1}js^{-1}K^{-1})^b(m^2)^d(K)^e(K)^f \quad (63)$$

Ако се приемат топлината и температурата като основни величини след заместване и групиране на членовете с еднакви степенни показатели от уравнение (63) се получава в безразмерен вид уравнението:

$$\frac{q_{оп}}{c} = \left(\frac{\lambda}{\alpha_{оп}\delta}\right)^b \left(\frac{F}{\delta^2}\right)^d \left(\frac{T_{mp}}{\Delta T}\right)^e \quad (65)$$

където $c = \alpha_{оп} \delta^2 \Delta T$ е коригиращ множител с размерност [W](66)

Комплексите от величини в уравнение (65) са безразмерни и съдържат основните фактори влияещи върху отведената от опората топлина и имат определен физически смисъл. Отношението $\frac{\lambda}{\alpha_{оп}\delta}$ представлява аналог (реципрочната стойност) на критерия на **Biot (Bi)** и е мяра за съотношението на кондуктивно пренесената в елементите на опората топлина, и отдадената от опората топлина чрез конвекция. Дебелината δ [m] е характерен геометричен размер и косвено влияе върху разпределението на температурата в елементите на опората. Отношението $\frac{F}{\delta^2}$ представлява обобщена геометрична характеристика на опората с акцентирано участие на δ на втора степен. Последния член от уравнение $\frac{T_{mp}}{\Delta T}$ указва посоката на топлообменния процес. Определяща е температурата на стените на топлопровода T_{mp} , която, е пряка функция на температурата на топлоносителя. При наличие на топлинна изолация двете температури са почти равни, тоест $T_{mp} \approx T_{fl}$. Експеримента протича на три етапа[138]:

1. Определяне на коефициента на топлопредаване $\alpha_{оп}$.

За определянето му се използва закона на **Newton- Richmann** в който, $\alpha_{оп}$ е коефициент на пропорционалност.

$$\tilde{q}_{оп} = \alpha_{оп} F(T_w - T_o) \quad (67)$$

Където: $\tilde{q}_{оп}$ е определената по опитен път топлинна мощност [W]

F е площта на опората [m²]

T_w е измерената с термовизионната камера интегрална т-ра на опората [C⁰]

T_o е температурата на околната среда.[C⁰]

2. Определяне на степенните показатели на критериалното уравнение (65).

Строго погледнато поради наличието на три критерия на подобие, решенията на задачата би следвало да бъдат разположени в тридименсионно пространство като обемна геометрична фигура, но понеже опората на която са провеждани експериментите има фиксирана повърхност и дебелина, безразмерния геометричен критерий $\frac{F}{\delta^2}$ има конкретна стойност — $\left(\frac{0,221}{0,002^2}\right) = 55250$. Това обстоятелство превръща задачата в двуфакторна като уравнението на математическия модел добива вида:

$$\left(\frac{q_{оп}}{\alpha_{оп}\delta^2\Delta T}\right) = (55250)^d \left(\frac{\lambda}{\alpha_{оп}\delta}\right)^b \left(\frac{T_o}{\Delta T}\right)^e \quad (68)$$

Известно е [124], че решенията на уравнения от този вид са разположени в равнинна геометрична фигура, формата и големината на която зависи от диапазона на изменението на аргументите на функцията. След логаритмуване на уравнение (68) уместно е да се

приложи субституцията:

$$y = \ln\left(\frac{q_{оп}}{\alpha_{оп} \delta^2 \Delta T}\right), \quad x_1 = \ln\left(\frac{\lambda}{\alpha_{оп} \delta}\right), \quad x_2 = \ln\left(\frac{T_0}{\Delta T}\right)$$

Неизвестните са три и задачата се свежда до решаването на линейна система с три уравнения:

$$\begin{cases} y_1 = d_{10,92} + b x_{11} + e x_{21} \\ y_2 = d_{10,92} + b x_{12} + e x_{22} \\ y_3 = d_{10,92} + b x_{13} + e x_{23} \end{cases} \quad (70)$$

В системата (70) y_i , x_{1i} и x_{2i} са определените по експериментален път усреднени стойности на безразмерните комплекси от уравнение (69) съгласно субституцията, докато d , b и e са неизвестните степенни показатели. Точността на алгебричния метод зависи от това дали едно от избраните уравнения ще премине през центъра на двуфакторното пространство което, в логаритмични координати има ортогонална геометрична интерпретация.

3. Валидиране на резултатите

След определение на степенните показатели критериалното уравнение (68) се превръща в регресионен математическия модел, достоверността и възпроизводимостта на резултатите от който, трябва посредством статистически анализ, следва да се съпоставят с реалните опитни резултати. Хипотезата за постоянство на дисперсията на експериментално определените резултати се проверява чрез G -критерия на **Cochrane**, а адекватността на математическия модел се проверява по F -критерия на **Fisher**. В степенна функция от вида на уравнение (68), безразмерния множител и степенния показател са с висока значимост и не е необходимо да се прави оценка по t -критерия на **Student** [124]

3.2.3. Характеристика на средствата за измерване

В този експеримент е използвана същата многопикселна термовизионна система **ThermaCam P60** техническите характеристики на която, са описани в 2.3.4. Измерването на температурата на стената в изолирания участък се осъществява с термосъпротивления **Pt 100**. Скоростта на въздушното течение се измерва със крилчат скоростомер **Testo 410-1**, техническите данни на който, са описани на стр. 100 в дисертационния труд.

3.3 Определяне на топлинните загуби в арматурите

Особеното на конкретната паропреносна мрежа е че, на магистралните паропроводи определени като обект на обследването има 6 спирателни арматури. Разгледани поотделно и топлинните загубите през всяка от тях, са съизмерими с другите конструктивни елементи, но като цяло те имат пренебрежимо малък дял в общите топлинни загуби. Намирането на подходящ математичен модел за топлинните загуби през всеки от арматурите и последващото му валидиране по експериментален път е възможно, но поради несъществения дял на тези локални загуби в общите загуби при наличието на достатъчно достоверни справочни данни, е нецелесъобразно. Данни за единичните стойности на загубите според диаметъра на арматурите са от [122] Сумарните загуби са:

$$a) \text{ паропровод 1 МПа } Q_{ap1.0} = \sum_{k=1}^2 q_{ap k} = 500 + 280 = 780 \text{ [W]} \quad (90)$$

$$b) \text{ паропровод 1.5 МПа } Q_{ap1.5} = \sum_{k=1}^1 q_{ap k} = 280 \text{ [W]} \quad (91)$$

$$c) \text{ паропровод 2.0 МПа } Q_{ap2.0} = \sum_{k=1}^3 q_{ap k} = 140 + 2 * 180 = 500 \text{ [W]} \quad (92)$$

Избора на константни стойности независещи от атмосферните условия внася несъществена от инженерна гледна неточност в топлинния баланс поради относително малките стойности на (Q_{ap}).

3.4 Експеримент за определяне коефициента на топлопредаване към околната среда от повърхността на реално действащи промишлени

паропроводи чрез термодинамичен баланс и използване на термовизионна камера

3.4.1.Цел и задачи

Конкретната цел е да се определи топлинния поток преминал от изолираната повърхност на намиращи се в реална промишлена експлоатация промишлени паропроводи към околната среда посредством измерване на повърхностната температура с термовизионна камера. Любопитна допълнителна задача е да се съпостави получения резултат за α_k с някои от най-разпространените и най-често използвани в инженерната практика зависимости.

3.4.2.Методология на експеримента

За да се определят топлинните загуби по формула (44), е необходимо се знаят геометричните параметри на паропроводите – диаметрите и дължината в съответните участъци, броя на колената, арматурите и опорите. За всеки конкретен паропровод геометричните параметри са определени от проекта на съоръжението. В рамките на експлоатационния пробег те са конструктивно постоянни и участват в уравнение (44) като независими величини. Експеримента обикновено се извършва нощем и протича на три етапа:

1.Определяне на топлинните загуби чрез енталпийния метод

Загубите на топлина по магистралните паропроводи на Лукойл Нефтохим Бургас е необходимо да бъдат определени предварително по енталпиен метод като еталон и база за сравнение. Загубите $\sum Q$ се определят поотделно за всеки един от трите паропровода:

$$\sum Q = (Q_0 + Q_{bu}) - \sum_1^n D_i h_i \quad (94)$$

Тук: $(Q_0 + Q_{bu})$ е топлинната мощност на топлоносителя, определена като сума на топлината на отпуснатата пара от ТЕЦ и котли-утилизаторите присъединени към съответния паропровод[W]

$\sum_1^n D_i h_i$ е топлината консумирана от производствените структури.[W] като D_i е разхода на пара на съответния консуматор [Kg/s]

h_i е енталпията на парата непосредствено преди съответния консуматор.[Kj/Kg]

2. Определяне на топлинните загуби като сума от загубите в отделните конструктивните елементи.

Съгласно (39) $\sum Q = Q_{лин} + Q_{кол} + Q_{оп} + Q_{ар}$

Първите три събираеми се определят по формули (40, 41, 89). За $Q_{ар}$ според конкретния паропровод се използва една от трите зависимости-(90),(91) или (92)

Следва:

1. Да се определят предварително геометричните параметри на паропровода – диаметрите и дължината в съответните участъци, радиусите на закръгления на колената и броя на колената, арматурите и опорите.

2. Да се измери с обикновен термометър температурата на околната среда T_0 [K]

3. Да се измери с термовизионната апаратура повърхностната температура на изолацията на паропровода в съответния участък където, се провежда измерването. Измерванията задължително се правят двустранно – от подветрената и наветрената страна на паропровода поради различните температури породени от обтичането на тръбата от въздушната струя. T_{ou} [K] се получава като се усреднят резултатите от всички измервания.

4. Да се измери с термовизионната апаратура повърхностната температура T_w [K] на видимата (неизолираната) част на опорите.

5. Да се измери с щатните контролно – измервателни прибори температурата на парата T_{f1} [K] в характерни точки по трасето на паропровода. Това е необходимо за да се определят достоверни стойности на T_{mp} [K] в различните участъци по дължината на паропровода изхождайки от условието $T_{mp}[K] \approx T_{f1}[K]$

6. Да се определи скоростта и посоката на вятъра в характерни точки на паропровода. Методология за определяне на скоростния профил въздушното течение и изчисление на коригираната скорост на вятъра по височина за градски условия е показана в наръчника на „The Institute of Heating and Ventilating Engineers, London“ [140], където за открита местност и група сгради в се предлага формулата:

$$W_{\text{вятър}} = W_m \left(\frac{h}{h_m} \right)^k \quad (98)$$

където: W_m [m/s] е скоростта на вятъра определен от метеорологическата служба на стандартна височина $h_m = 10 \text{ m}$

h е височината на естакадата [m]

k е коефициент отчитащ разположението на сградата като: $k=0,15$ за открита местност; $k=0,29$ за група сгради.

Установено е че, при конкретната плътност на заводското застрояване коефициента k варира в интервала $0,18 \div 0,22$ в зависимост от близостта на производствените инсталации и наличието на административни и битови сгради до естакадата. Като се отчете че, магистралните паропроводи са разположени на най-горната етажерка на височина 4,8 m формула (98) добива вида:

$$W_{4.8} = W_m \left(\frac{4.8}{10} \right)^{0.2} = 0.8635 W_m \quad (99)$$

Скоростта и посоката на вятъра се приемат за достоверни ако разликата между приведените към 4,8m метеорологични данни и локалните измервания на същата височина не се различават една от друга с повече от 10 %.

3. Определяне на коефициента на топлопредаване α_k

Основната трудност за намирането на конвективния топлопленос от повърхността на паропровода към околната среда Q_k е да се определи достоверна стойност на коефициента на топлопредаване α_k . За къси участъци и отделни сегменти от паропровода може да се използва критериалното уравнение (16), или коя да е от неговите производни или емпирични зависимости предложени от различни автори показани в литературния обзор (ф-ли 19 – 28). За създаването на софтуер с достоверни резултати на топлинните загуби, е необходимо да се знае интегралната стойност на коефициента α_k за повърхността на целия паропровод, а не само за единица дължина или за отделен негов сегмент. Това е така защото паропроводите са дълги, и дори малки различия между локалните и интегралната стойност на коефициента на конвективен топлообмен, биха довели до големи грешки в резултатите. Познаването на топлинните загуби определени по енталпийния метод (въпреки цялата му условност), позволява да бъде определена като неизвестна величина интегралната стойност на коефициента на топлопредаване, като

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(T_{ou} - T_o) \pi D_{ou} L} \quad (100)$$

При извършване на достатъчен брой опити, посредством метода на най-малките квадрати е целесъобразно да се потърси уравнение на регресията, чрез което да се съпоставят експериментално получените интегрални стойности за α_k . В качеството на математически модел може да се използва общопризнатото уравнение (16). Функцията от вида $Nu=f(Re, \epsilon_f)$ предполага извършването на двуфакторни експерименти, но използването на формула (17) опростява задачата и я свежда до обикновена степенна функция която, в логаритмични координати представлява уравнение на права от вида

$$\ln Nu = \ln(C_2 \epsilon_\psi) + m \ln Re \quad (101)$$

Удобно е да се приложи субституцията $x = \ln Re$, $y = \ln Nu$, $b = \ln(C_2 \epsilon_\psi)$ чрез която, уравнение (101) се превръща в линейно от вида:

$$y = b + mx \quad (102)$$

където: y е определената по експериментален път величина, на базата на конкретните стойности на коефициента на топлопредаване α_k определен по (100), а b и m са неизвестните константи. След определянето на коефициентите m , b и корекционния коефициент за посоката на вятъра спрямо оста на тръбата ϵ_ψ , посредством антилогаритмуване се получава търсеното уравнение на математическия модел

Измерванията са извършени в интервала 15.06.2014 – 10.8.2015 в рамките на четирите климатични сезона при външна температура от $(-8)^\circ\text{C}$ до $(+26)^\circ\text{C}$ и променлив по скорост (W) и направление вятър, с пориви от $0,7\text{ m/s}$ до $7,4\text{ m/s}$ в посока север – североизток, което представлява отклонение спрямо оста на естакадата в диапазона 45° до 70° . Това е преобладаващото направление на розата на ветровете през по-голямата част от годината в района където е разположен обекта на изследването.

ГЛАВА 4.

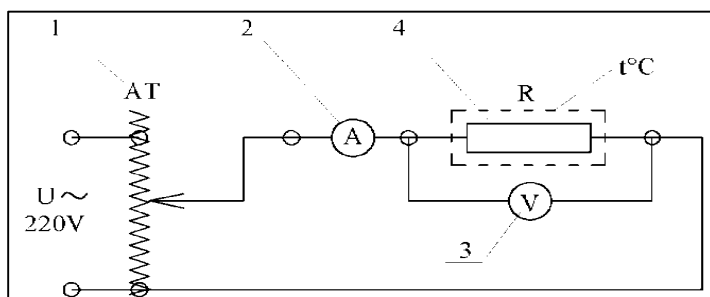
4.1 Лабораторен стенд за провеждане експеримента описан в 3.1



Фиг.29. Лабораторен стенд а) Образец 1; б) Образец 2

В промишлени условия в зависимост от времето на последния ремонт състоянието на ламариненото покритие е различно за различни участъци дори на един и същ паропровод. В ИПФ Сливен на ТУ София, е създаден лабораторен стенд имитиращ действащ паропровод DN300 с дължина 1m. Използвани са два образца от еднакъв материал (поцинкована ламарина) но с различни оптически свойства. Едната (Образец 1) е съвсем нова с висока степен на отразителна способност, а другата (Образец 2) е стара, с множество корозионни петна и висока степен на дифузно излъчване (Фиг. 29)

Топлината се генерира от електрически нагревател с мощност $2000W$ навит около керамична вложка с дължина $800mm$ поставен зад контролната повърхност. Интензивността на топлинния поток се променя посредством промяна на напрежението чрез автотрансформатор. В качеството на еталон повърхностната температура се измерва от термосъпротивления Pt 100. Принципната схема на опитната установка е показана на Фиг. 30.



Фиг.30. Принципната схема

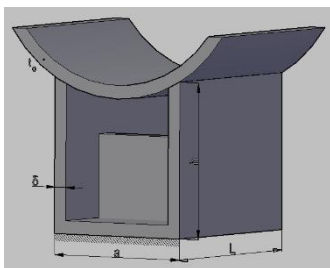
1 – Автотрансформатор; 2 – Амперметър; 3 – Волтметър; 4 – Нагревател.

При извършването на експеримента са взети максимално възможните мерки за да се избегне влиянието на пряката слънчева радиация и да се ограничи фоновото излъчване от намиращи се в близост предмети. За целта опитите са проведени след залез слънце в затъмнена стая, а опитната установка беше допълнително екранирана. Местата на оператора са строго фиксирани зад екранната повърхност. Напрежението се променя от $25V$ до $125V$ със стъпка от $25V$, което предопределя повишаване температурата на образците от 30 до 150°C . Обхвата на измерването е достатъчен, понеже надвишава

значително диапазона на изменение на повърхностната температура на реално действащи паропроводи с ненарушена цялост на изолацията.

4.1 Лабораторен стенд за провеждане експеримента описан в 3.2

Обекта на изследване са статичните опори на магистралните паропроводи в паропрепращащата мрежа на „Лукойл Нефтохим“ Бургас. Разглежданата конструкция, като самостоятелен детайл е типова и се използва за паропроводи с диаметри от DN 300 до DN 600. На Фиг. 41 е показано пространственото изображение на такава опора, на което, са нанесени характерните за конструкцията размери като променливи параметрични величини.



Фиг.41 Схема на опората с нанесени характерните за конструкцията размери

Същата опора в естествени размери е елемент от лабораторен стенд (Фиг.38) конструиран в ИПФ Сливен на ТУ София. Източник на топлина са вградените електронагреватели. При достатъчно дебела изолация на стените, условията са близки до адиабатните, при което внесенията и преобразувана в топлина електроенергия е равна на топлинния поток преминаващ през опората.



Фиг.38. Опитен стенд за определяне на топлинния поток през опората

Интензивността на топлинния поток се променя посредством промяна на напрежението чрез автотрансформатор. Температура на стената на тръбата се измерва с термосъпротивления $R_t 100$. Лабораторния стенд позволява да се определи по емпиричен път зависимостта $\alpha_{оп} = f(v)$ в обхват от естествена конвекция при $v=0$ [m/s] до ясно изразено течение с $v=10$ [m/s]. Динамиката на атмосферните условия се имитират, чрез въздушното течение създавано от вентилатор. Измерва се консумираната електрическа мощност на нагревателите (т.е. Q) и температурната разлика между температурата на неизолираната повърхност на опората (T_w) и температурата на околната среда (T_{oc}) в условията на стационарен топлообмен, при различни скорости и ъгли на обтичане на опората от въздушното течение.

4.3 Промислен експеримент описан в 3.3

Обекта на изследване са основните магистрални паропроводи на територията на „Лукойл Нефтохим Бургас“ както следва:

Два паралелни паропровода за прегрята пара ниско налягане $P_{lp}= 1\text{MPa}$ и начална температура $t_{lp}= 250^\circ\text{C}$, от които работи единият, а другият е в резерв. Работещият паропровод има дължина 3317 m, от които 2990 m с диаметър на тръбата(заедно с изолацията) $\varnothing 800\text{ mm}$, а останалите 327 m са с диаметър $\varnothing 500\text{ mm}$. Обект на обследването е първия участък с 216 подвижни и неподвижни опори и две арматура – Ду 800 на изхода от ТЕЦ и Ду 400 при присъединяването на котел – утилизатора на инсталация „Каталитичен крекинг“.

Паропровод за прегрята пара за средно налягане $P_{mp}=1,5\text{MPa}$ и начална температура $t_{mp}=315^\circ\text{C}$. Паропроводът има сумарна дължина 3355 m, и също се състои от две части. Обект на обследване са 2867 m от първият участък с диаметър на тръбата $\varnothing 400\text{ mm}$ в която, подвижните и неподвижните опори са 228. В участъка има една арматура Ду 400 на изхода от ТЕЦ

Два паралелни паропровода за прегрята пара за високо налягане $P_{hp}=2\text{MPa}$ и начална температура $t_{hp}=360^\circ\text{C}$, от които, работи единият с дължина 3360 m, като: 3163 m са с диаметър 300 mm и 147 m с диаметър $\varnothing 200\text{ mm}$. Изследвани са и двата участъка. Опорите са 334 и три арматури- Ду 300 на изхода от ТЕЦ и две Ду 200 – една при прехода на тръбопровода от Ду 300 към Ду 200 и една при присъединяването на котел – утилизатора на инсталация „ВИ-15“.

Според проектната документация основните характеристики на положената изолация на трите паропроводът е една и съща и се състои от стъклена вата валирана с рабицова мрежа три пласта по 50mm всеки пласт и коефициент на топлопроводност $\lambda_{из}=0,47 \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$ и външно покритие от поцинкована ламарина с дебелина 0,8mm.

4.4 Приложен софтуер за определяне на топлинни загуби на паропровод

4.4.1 Въведение

Ползвателите на една програма за експресно определяне на топлинните загуби през паропроводи в реално време биха могли да бъдат инженерно – технически звена в промишлени предприятия които, менажират енергийното потребление и контролират енергийната ефективност. Тя не може да бъде алтернатива на енталпийния метод който, е нормативно регламентиран, но може да бъде изключително полезна за определяне на топлинните загуби на отделни участъци от топлинната мрежа, както и за оценка на едно или друго управляващо въздействие, конкретен ремонт или замяна на компрометирана изолация. За да постигнат тези цели програмата следва да се структурира с улеснен и приложно ориентиран интерфейс.

4.4.2 Алгоритъм на програмата

Математическия модел на който, следва да се базира програмния продукт е уравнение (44). В уравнението, според конфигурацията и геометричните характеристики на паропровода, известните величини са: дължината на паропровода L [m], диаметъра на изолацията D_{ou} [m], броя m и радиуса на колената R [m], дебелината на ламаринения профил δ [m] и броя на опорите g , вида и броя на арматурите p от всеки вид прилежащи към съответния паропровод. Тези данни заедно с топлинните загуби през арматурите по видове се задават предварително като входяща база данни. За магистралните паропроводи на *Лукойл Нефтохим Бургас* веднъж въведени те остават константна величина. Средната температура на повърхността на изолацията T_{ou} [K], средната температура на видимата част на опорите T_w [K], се измерват с термовизионната апаратура и се въвеждат като входящи данни заедно с избрания паропровод. Метеорологични данни за температурата на околната среда T_o [K], посоката и скоростта на вятъра $V \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ се получават от дежурния по комбинат или се извършват собствени измервания и също се въвеждат в базата данни. По софтуерен път се определят:

1. Конвективната съставляща α_k чрез критериалното уравнение (104), получено на базата на промишлените експерименти.

2. Коефициента за корекция посоката на вятъра спрямо оста на паропровода ε_{ψ} по формула (17)

3. Радиационната съставляща α_r (13) За обекти с висока рефлексия (новопоставена ламаринена обвивка) е задължително определянето на степента на чернота ε_{ou} във формулата да се извършва, като използва математическата апроксимация (54). За всички останали случаи въвеждането в програмата на постоянна стойност на $\varepsilon_{ou}=0,95$ е

допустимо.

4. Сумата от загубите в линейната част $Q_{\text{лин}}$ (40)
5. Сумата от загубите в колената и колената $Q_{\text{кол}}$ (41)
6. Средната температура на парата $T_{\text{пр}}$. По същество това е температурата на насищане при съответното налягане. Предопределя се от избора на конкретния паропровод.
7. Температурната разлика $\Delta T = T_w - T_0$
8. Коефициента на топлопредаване от неизолираната повърхност на опората към околната среда $\alpha_{\text{оп}}$ като функция на скоростта и посоката на вятъра участващ в уравнение (83).
9. Критерия на Biot $Bi = \frac{\alpha_{\text{оп}} \delta}{\lambda}$
10. Безразмерната температура $\theta = \frac{T_0}{\Delta T}$
11. Местните топлинни загуби през опорите $q_{\text{оп}}$ чрез критериалното уравнение (83)
12. Сумата от загубите през всички опори $Q_{\text{оп}}$ по формула (89).
- 13 Сумата от загубите през всички опори $Q_{\text{ар}}$ по формула (90), (91) или (92) в зависимост от предварително избрания паропровод.

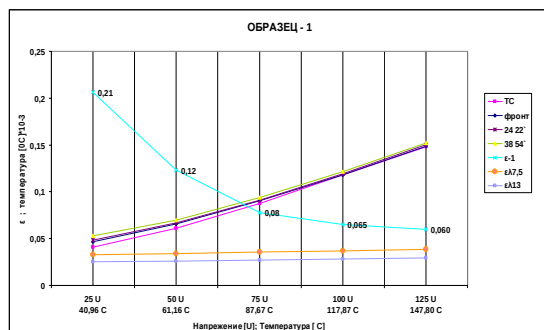
На Фиг.62 в дисертационния труд е показана опростена блок схема от която се виждат взаимовръзките между участващите в топлотехническата задача величини.

ГЛАВА 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОВЕРКА

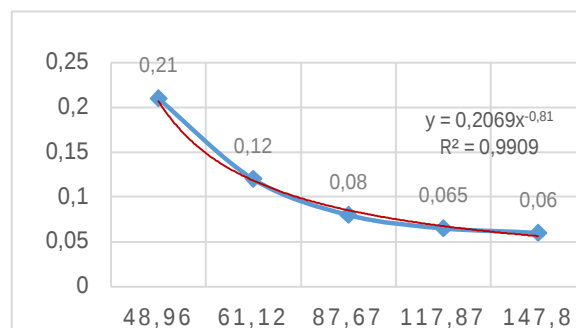
5.1 Резултати и анализ от експеримента описан в 3.1

Определени са по опитен път, зависимостта на степента на чернота (излъчвателната способност) $\varepsilon_{(\lambda, T)}$ от температурата на повърхността на обекта в спектралния диапазон $7,5 \div 13 \mu\text{m}$ и коефициента $\varepsilon_{(\beta)}$ за компенсиране грешките произтичащи от позиционирането на обектива под ъгъл спрямо фронталната директория към обекта при измерване с термовизионна камера. Прави впечатление голямата разлика в получените резултати при Образец 1 и Образец 2.

При Образец 1 в интервала от 60 до 150°C температурата се повишава линейно с повишаване на напрежението. Известна нелинейност се отбелязва в нискотемпературната област, както е показано на Фиг.32. Измерените с термовизионната система температури нарастват с увеличаването на топлинния поток по аналогичен начин.



Фиг.32 Съпоставка на измерените температури на Образец 1



Фиг.33 Апроксимация на опитно установената зависимост $\varepsilon_{(\lambda, T)} = f(T)$

Определената по опитен път степен на чернота на Образец 1. (линията със син цвят, номерирана като (ε-1), на същата фигура) показва експериментално получената функционална зависимост $\varepsilon_{(\lambda, T)} = f(T)$. Касае се за низходяща нелинейна крива, асимптотично сходяща към права линия успоредна на абсцисата при стойност на

$\varepsilon_{(\lambda,T)} = 0.06$. На Фиг.33 с червената линия, в по-голям мащаб е показана алгебричната апроксимация на опитно построената зависимост $\varepsilon_{(\lambda,T)} = f(T)$. От фигурата е видно, че много добра корелация (критерий на **Pirson** $R^2=0,9909$) показва степенната функция

$$\varepsilon_{(\lambda,T)} = 0.2069(T)^{0.81} \quad (58)$$

За математическата апроксимация (58) и R^2 - критерия на **Pirson** са използвани стандартни функции **Trendline** и **Adjusted R Square** в **Excel**.

Разликата в резултатите между измерената по радиационен път температура и еталонното измерване обуславя относителната грешка която, за трите позиции на обектива на термовизионната камера спрямо обекта, е посочена в Табл.4

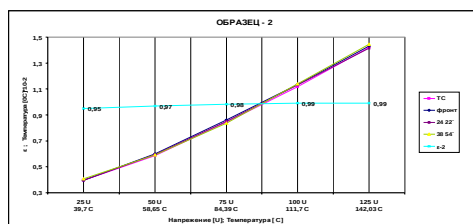
Табл.4

Напрежение, [U]	ТС	TV - фронтално		TV - 24°22'		TV - 38°54'	
	Темп, [°C]	Темп, [°C]	отн.гр δ , [%]	Темп, [°C]	Темп, [°C]	Темп, [°C]	отн.гр δ , [%]
25	40,96	46,78	14,21	48,34	18,02	53,2	29,88
50	61,16	65,78	7,56	66,82	9,26	69,52	13,68
75	87,67	90,58	3,32	91,25	4,08	93,7	6,88
100	117,87	118	0,11	119,2	1,13	121,4	3,00
125	147,80	148,7	0,61	150,3	1,69	152,2	2,98

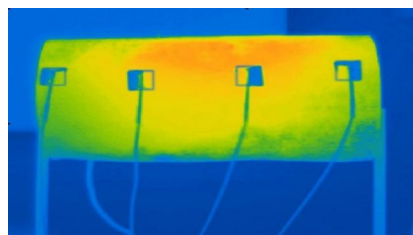
Табл. 4. Относителната грешка между измерената по радиационен път температура и еталонното измерване с термосъпротивления при различно позициониране на камерата

Видно е че, грешката расте в посока към ниските температури като за първите две температурни нива достига неприемливи стойности. Вероятната причина, е намаляващия контраст на обекта в общия топлинен фон. За усилване ефекта от фоновите смущения и нарастването на грешката очевидно допринасят високата отражателна способност, специфичната геометричната форма и оптичските характеристики на обекта. Касае се за изпъкнало цилиндрично огледало с отрицателен фокус, в което поради широкоъгълния обхват, независимо от екранирането попадат странични лъчения. Тези обстоятелства поставят под съмнение достоверността на измерванията на обекти с $\varepsilon_{(\lambda,T)} < 0.2$ за температурно-ниски от 60°C особено през летния сезон. С повишаване на температурата, измерванията с термовизионната камера асимптотично се приближават към еталонните, като относителната грешка при температура над 80°C е в рамките на задоволителната точност за инженерно-техническите разчети. Следва извода, че при обекти с висока отражателна способност на повърхността, радиометричните измервания са допустими само при наличието на отчетлив контраст на термодинамичната им температура спрямо околния фон. Влиянието на позицията на камерата при Образец 1 е значително. Това е особено отчетливо в зоната на ниските температури (табл. 4)където относителната грешка достига 29,88 %. Тези наблюдения потвърждават изказаната в **Borchert** [074], **Newport**[075] и **Крикунов** [077] теза че, при обекти с ниска степен на чернота отклоненията от закона на **Lambert** са по-силно изразени.

При Образец 2, измерванията с термовизионна камера и еталонните съпротивления почти съвпадат (Фиг.34).



Фиг.34 Съвпасть на измерените температури на Образец 2



Фиг. 35. Инфраграма на Образец 2

Неочаквани са относително високите, доближаващи до 1 стойности на $\varepsilon_{\lambda T}$. От направените инфраграми (Фиг.35) се вижда че, при температури над 50°C еталонната лепенка напълно се слива с околната повърхнина и е невидима.

Относителната грешка на термовизионното определяне на температурата спрямо еталонното в целия диапазон на измерването е под 3% . Позиционирането на обектива под ъгъл до 38°54' спрямо нормалата не води до компрометиране на резултатите от измерването (Табл. 5). Това обстоятелство дава по-голяма степен на свобода на оператора да извършва промишлени обследвания на обекти при които, не е възможно фронтално позициониране.

Табл.5

Напрежение, [U]	ТС	TV - фронтално		TV - 24°22'		TV - 38°54'	
	Темп, [°C]	Темп, [°C]	отн.гр δ , [%]	Темп, [°C]	отн.гр δ , [%]	Темп, [°C]	отн.гр δ , [%]
25	39,7	39,75	0,13	39,75	0,13	40,78	2,72
50	58,65	60,12	2,50	59,43	1,32	59,3	1,10
75	84,39	86,18	2,12	85,03	0,76	86,93	0,03
100	111,7	113,5	1,61	113	1,16	113,9	1,97
125	142,03	143	0,68	141,5	-0,38	144,4	1,67

Табл.5 Относителната грешка между измерената по радиационен път температура и еталонното измерване с термосъпротивления при различно позициониране на термовизионната камера спрямо обекта (Обрѐзац2)

Статистическия анализ на резултатите с данни за дисперсията за оценка на възпроизводимостта, резултативната дисперсия и стандартната грешка за Образец 1 са показани в Табл.7, а за Образец 2 в Табл.8. стр 87 в дисертационния труд.

Изводите които могат да се направят от този експеримент са:

1. Термовизионни измервания на повърхностната температура на промишлени паропроводи с цел определяне загубите по преноса на топлина посредством термовизионна система е допустимо за практически цели ако се минимизират факторите, които влияят негативно на точността на измерването.

2. Сравнителния анализ показва че, основна грешка се допуска при определянето на $\varepsilon_{\lambda T}$ Това е особено отчетливо при ремонтирани участъци от паропровода, с ново покритие от цинкувана ламарина с висока отражателна способност. При летни температури съществено влияние оказва температурния фон. Препоръчително е измерванията да се правят при сухо време и задължително нощем.

3. Позиционирането на обектива спрямо измервания участък от паропровода следва да се доближава фронталното с максимално допустимо отклонение до 25° от нормалата.

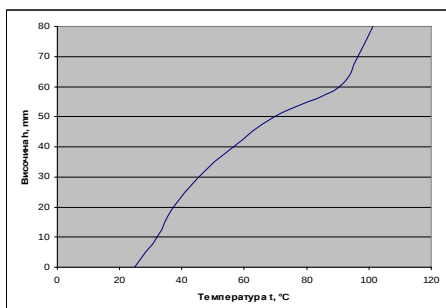
4. Потвърждават се литературните данни за висока точност на радиометричните изследвания при $\varepsilon_{\lambda T} > 0,85$.

5.2 Резултати и анализ от експеримента е описан в 3.2

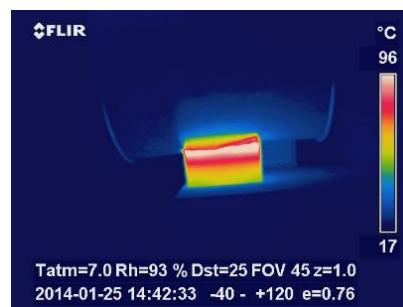
Резултата от експеримента се свежда до количествена оценка на топлинните загуби в статични опори на паропроводи, чрез измерване на повърхностната температура с термовизионна камера при различни условия на конвективния топлообмен, съгласно

заложената в плана на експеримента методика(раздел 2.4.2 в дисертацията).

Страничните и Фронталните термовизионните снимки на опората визуализират изотермите на температурното поле на повърхността на опората. Инфраграмата показана на Фиг.42 е при странично позициониране на термовизионната камера. На Фиг.43 е показана единична изотерма от температурното поле. Ясно се вижда нарастващия по височина градиент на температурата. Не се наблюдава промяна на температурата в хоризонтално направление. Термовизионните снимки отляво и отдясно на опората са идентични.

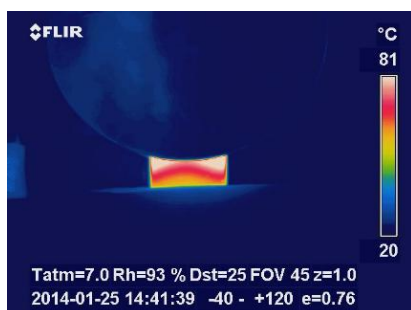


Фиг.42 Температурно поле на опората
(при странично позициониране на
термовизионната

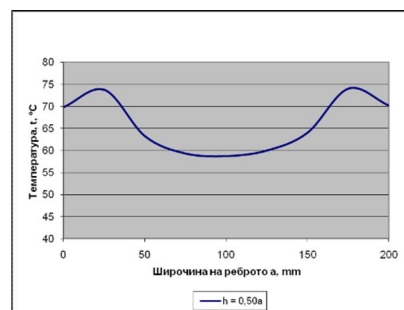


Фиг.43.Ходограф на температурата на
опората по височина (при странично
позициониране на термовизионната камера)

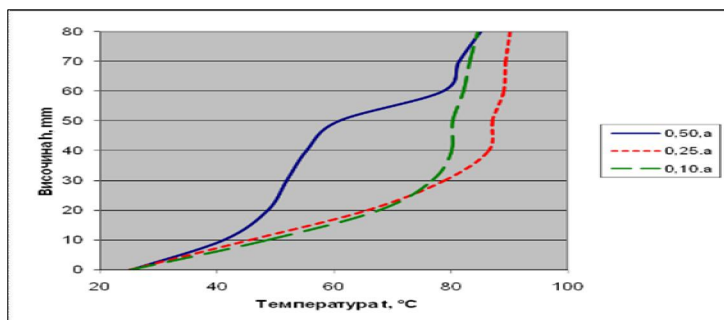
Инфраграмата показана на Фиг.44 е при фронтално позициониране на термовизионната камера. Температурното поле е много характерно като ходографа на изотермите се променя както във вертикално така и в хоризонтално направление. На Фиг.45 е показано изменението на температурата по височина, а на Фиг.46 по широчина.



Фиг. 44. Температурно поле на опората
фронтално позициониране
термовизионната камера) по височина



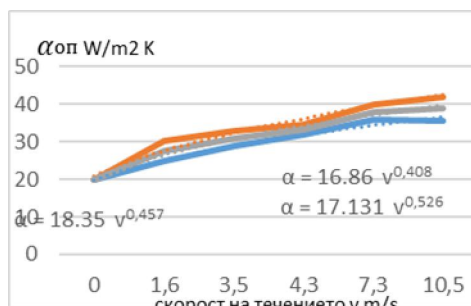
Фиг.45 Ходограф на температурата на (при
(при фронтално позициониране на
термовизионната камера по широчина)



Фиг.46 Ходограф на температурата на
опората (при фронтално позициониране на
термовизионната камера) по широчина

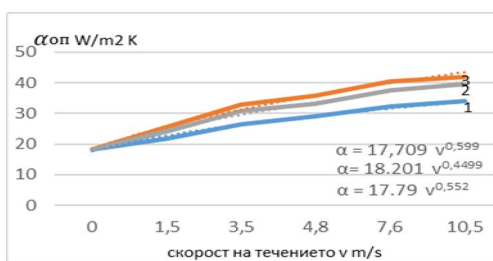
При фиксирани стойности на дебелината на опората $\delta = 0,002$ [m], площта на неизолираната част $F=0,221$ [m²], и коефициента на топлопроводност на метала $\lambda=52$ [W/m.K], независимите променливи са коефициента на конвективен топлообмен $\alpha_{оп}$ (като функция на скоростта на течението) и температурната

разлика между интегралната температура на повърхността на опората и околната среда ΔT . Между двете величини съществува зависимост установена от закона на **Newton–Richman** (67), който както е известно [023], е гранично условие от трети род на частното диференциално уравнение описващо температурното поле в твърди тела при стационарна топлопроводност. Резултатите в графичен вид са показани на Фиг. 47, 48 и 49.



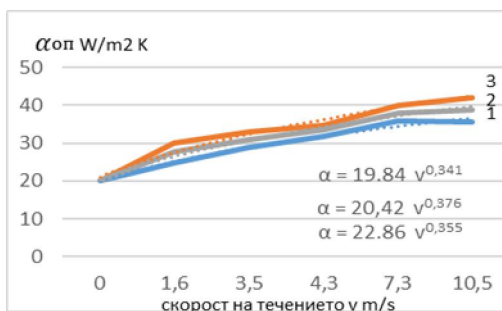
Фиг.47 Апроксимация на опитно установената зависимост $\alpha_{оп} = f(v)$ при $T_0 = 183^\circ\text{C}$

$$1 = \frac{\pi}{2} \text{ rad}; 2 = \frac{\pi}{6} \text{ rad}; 3 = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$$



Фиг.48 Апроксимация на опитно установената зависимост $\alpha_{оп} = f(v)$ при $T_0 = 205^\circ\text{C}$

$$1 = \frac{\pi}{2} \text{ rad}; 2 = \frac{\pi}{6} \text{ rad}; 3 = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$$



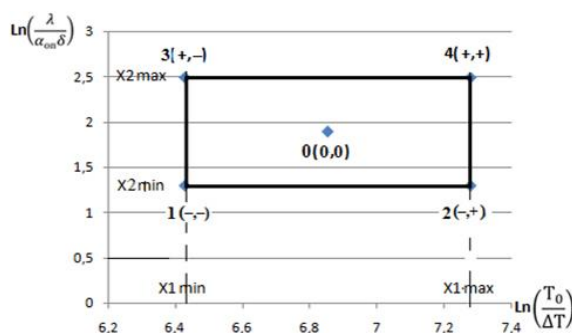
Фиг.49 Апроксимация на опитно установената зависимост $\alpha_{оп} = f(v)$ при $T_0 = 241^\circ\text{C}$

$$1 = \frac{\pi}{2} \text{ rad}; 2 = \frac{\pi}{6} \text{ rad}; 3 = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$$

Получените на базата на емпиричните данни зависимости са апроксимирани като степенна функция посредством добавяне на **Trendline** в **Exel**. Уравненията като степенна функция са изписани като допълнение на съответните графики.

За обобщаване на резултатите от експеримента е приложен метода на ортогонално планиране с използване на нормализирани фактори. Матрицата на плана на експеримента се определя от крайните точки на факторното пространство. Процедурата по нормализация, по същество се свежда до това, че разполагайки с максималното и минималното логаритмично значение на двата фактора ($x_{\max}$ и $x_{\min}$) се определя едно на средното значение x_0 за всеки един от двата фактора. Тези „нулеви“ стойности на x_1 и x_2

съгласно [124] определят координатите на централната точка на плана през която минава едно от уравненията на системата(70) Графичната интерпретация е показана на Фиг.50.



Фиг.50 Графичен вид на областта на решенията в логаритмични координати

При тези гранични условия за всяка отделна точка са проведени експерименти за определяне на топлинния товар. Така се спазва условието за най-малко квадратично отклонение, тъй като те са равноотдалечени от централната точка и регресионното уравнение в логаритмични координати добива вида:

$$y = D^* + B^*x_1^* + E^*x_2^* \quad (78)$$

Чрез обратната трансформация се получават коефициентите на регресия (степенните показатели) в натуралното уравнение(68)което добива окончателния си вид

$$q_{оп} = \alpha_{оп} \delta^2 \Delta T \frac{(55250)^{0,9167} \theta^{0,0797}}{Bi^{0,1108}} [W] \quad (83)$$

където: $Bi = \frac{\alpha_{оп} \delta}{\lambda}$ е критерия на **Bio**

$$\theta = \frac{T_0}{\Delta T} \text{ е безразмерната температура}$$

За адекватни се считат тези математически модели при които, се съблюдава условието за еднородност на двете дисперсии:

а) дисперсията за възпроизводимост

$$S_{(q_{оп})}^2 = \frac{\sum_1^n (q_{(оп)ij} - \bar{q}_{(оп)i})^2}{n-1} \quad (84)$$

където: $q_{(оп)ij}$ са измерените стойности на топлинните загуби в опората за всеки j^{th} пореден опит, във всяка i^{th} точка ограничаваща областта на решенията [W]

$\bar{q}_{(оп)i}$ е средно аритметичното значение на топлинните загуби в опората за серията опити в i^{th} точка [W]

$$b) \text{ дисперсията за адекватност } S_{(ад)}^2 = \frac{\sum_1^n n(\bar{q}_{(оп)i} - \hat{q}_{(оп)i})^2}{N-L} \quad (85)$$

където: L е количеството на значими коефициенти (в случая 2)

$\hat{q}_{(оп)i}$ е пресметнатата стойност, определено чрез математическия модел [W]

N е броя на точките във факторното пространство в които, са се провеждали опитите (в случая 4)

n е количеството на паралелните опити във всяка i -та точка (в случая 3). Статистически анализ на експерименталните резултати и съпоставка с прогнозните определени по математическия модел (82) са представени в Табл.13.в дисертационния труд. За проверка хипотезата за еднородност е направена оценка чрез G - критерия на

$$Cochrane \ G = \frac{S_{(y)}^2 l_{max}}{\sum_1^N S_{(y)i}^2} = \frac{24.477}{80.448} = 0.304 \leq G_{табл} = 0.7457 \quad (86)$$

където $S_{(y)i.\max}^2$ е максималната регистрирана стойност на средно квадратичното отклонение, а $G_{\text{табл.}}$ е табличната стойност на критерия при доверителна вероятност 0,95 [124] За проверка хипотезата за адекватност е направена оценка чрез F -критерия на **Ficher**

$$F = \frac{S_{(ad)}^2}{S_{(y)i}^2} = \frac{80.448}{94.290} = 0.853 \leq F_{\text{табл}} = 04.46 \quad (87)$$

където: $F_{\text{табл}}$ е табличната стойност на критерия при доверителна вероятност 0,95

Добавянето на геометричния критерий на подобие $\left(\frac{F}{\delta^2}\right)$ на мястото на константата 55250 при същите степенни показатели превръща уравнение (82) във:

$$\left(\frac{q_{оп}}{\alpha_{оп} \delta^2 \Delta T}\right) = \left(\frac{F}{\delta^2}\right)^{0.9167} \left(\frac{\lambda}{\alpha_{оп} \delta}\right)^{0.1108} \left(\frac{T_{\delta}}{\Delta T}\right)^{0.0797} \quad (88)$$

С голяма достоверност може да се предположи че, в този вид решенията на уравнение (88) ще са удовлетворителни за всякакви и с различна конфигурация опори, но за да се ползва то в качеството му на универсален математически модел за оценка на топлинните загуби през статични опори, това предположение трябва да се докаже експериментално.

На базата на получените резултати изводите и заключенията които, могат да се направят от този експеримент са:

1. Намерена е функционална зависимост $\alpha_{оп} = f(v)$ при $T_0 = \text{const}$. Апроксимацията на експерименталните криви в степенна функция позволява за аналитично определянето на $\alpha_{оп}$ за даден температурен режим при известна скорост и посока на вятъра.

2. Посредством метода на „анализ на размерностите“ е получено критериално уравнение което, удовлетворява условията на топлотехническата задача за намиране на топлинния поток през тънкостенни пространствени тела, каквито са статичните опори на топлопроводите.

3. Анализирани са резултатите от експеримента и са определени степенните показатели на критериалното уравнение.

4. Уравнението удовлетворява с 95 % достоверна вероятност критериите **Cochrane** и **Fisher** за възпроизводимост и адекватност на резултатите и може да се използва като математически модел за определяне топлинните загуби през статични опори на паропроводи. В конкретния случай се касае за еднотипни опори с еднакви размери поради което формула (42) придобива вида:

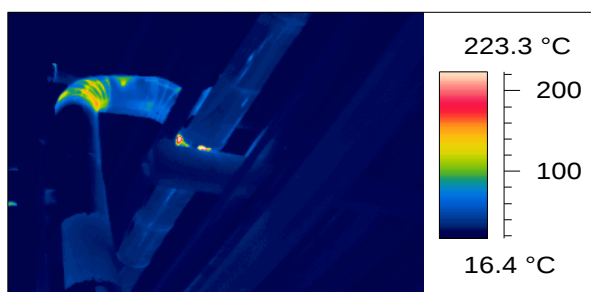
$$Q_{оп} = g q_{(оп)} \quad (89)$$

където g е броя на опорите

5. Създадения математическия модел е много важен етап, без който, не може да се постигне основната цел на настоящия дисертационен труд, а именно да се изготви инженерно приложим софтуер за определяне на сумарните топлинни загуби на паропроводите на площадката на “Лукойл Нефтохим Бургас” посредством измерване на повърхностната им температура чрез термовизионна апаратура.

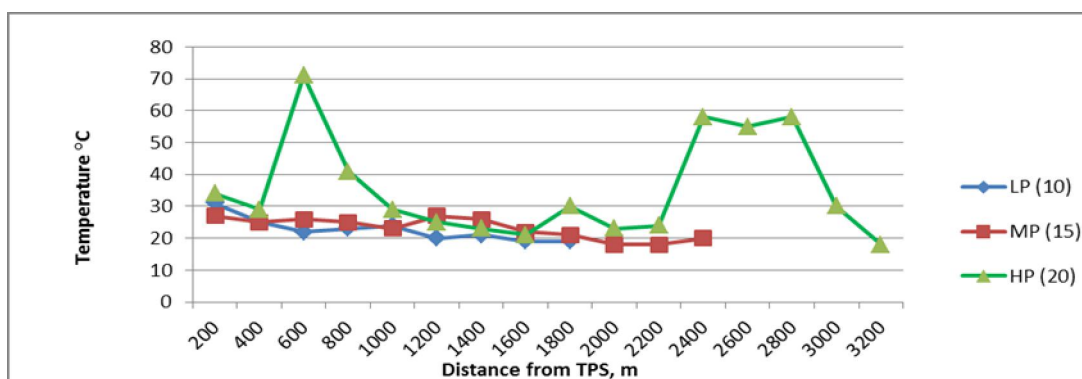
5.3 Резултати и анализ от експеримента описан в 3.3

Потвърждава се техническата възможност да се снимат с широкоъгълен обектив сравнително големи участъци от паропроводната мрежа. На фигура 53 е показана термовизионна снимка на сегмент от паропровода с типични участъци с концентрация на топлинните загуби.



Фиг.53 Типични участъци с концентрация на топлинните загуби

От термограмата ясно се вижда, че топлинните загуби се концентрират в локални участъци както следва: опорите, участъците в близост до тях и колената на компенсаторите и отклоненията. Измерванията са направени през равно разстояние, като началото е точката от която, паропроводът излиза от ТЕЦ, а края – точката, където свършва обекта на изследването. На Фигура 56 е показано изменението на повърхностната температура по дължина на трите паропровода, зафиксирани на 18.1.2015.



Фиг.56 Изменение на повърхностната температура на паропроводите

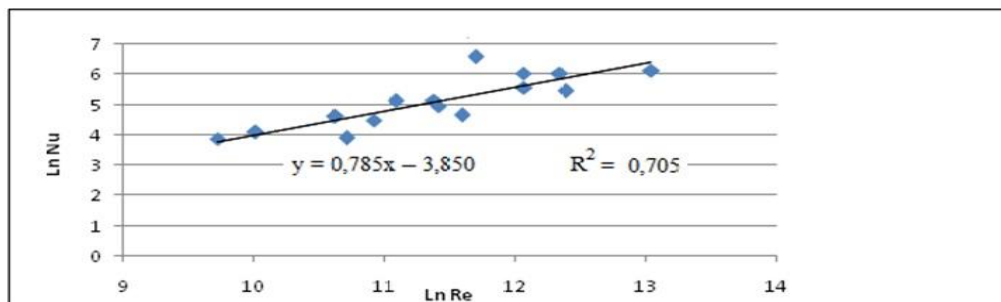
От данните в графиката се вижда че, по дължина на паропроводите повърхностната температура следва тенденция към понижаване от началото към крайните точки. От анализа на извършените термовизионни измервания и построените графики на база измерена температура на повърхността на изолацията ясно се вижда че, изолацията на паропровод високо налягане е в най-лошо състояние, особено в крайните участъци което, е предпоставка за големи топлинни загуби в тази зона. В най-добро състояние е изолацията на паропровода с налягане на парата 1,5 МПа. В Табл.15 е показана представителна извадка с данни за пет календарни дни с различно съчетание на атмосферните условия. В таблицата с T_{ou} е означена усреднената интегрална температура на повърхността на паропроводите а с T_w усреднената интегрална температура на всички опори.

Табл.15

Parameters Data	Скорост	Посока	Темп.	Кин. в-т	Коеф. т-ст	LP (1MPa)		MP (1,5MPa)		HP (2MPa)	
	V	ψ	T_o	v	λ_a	T_{ou}	T_w	T_{ou}	T_w	T_{ou}	T_w
Dimens.	[m/s]	[arc. deg]	[°C]	m/s ²	W/m K	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
15.06.2014	0,85	70	22	15,11	0,0257	42	58	41	69	48	75
07.10.2014	3,2	50	13	14,66	0,025	37	53	39	64	42	70
18.01.2015	7,4	60	-8	12,9	0,023	25	49	25	57	31	66
06.03.2015	4	45	2	13,8	0,0243	30	55	31	62	38	69
10.08.2015	2,1	50	26	15,2	0,026	45	59	46	71	35	76

Табл.15 Представителна извадка от измервателните протоколи

Определени са загубите на топлина през опорите (89) и арматурата на конкретния паропровод (90),(91) или (92) и радиационната компонента на топлинните загуби през цилиндричната повърхност (97). Конвективната част от топлинните загуби съгласно изложената в т.2.6.2 методология е определена от съвместното решение на уравнения (94) и (95). Структурата на топлинните загуби в трите паропровода са представени таблично в Табл.17 и визуализирани на фигури 57, 58 и 59. в дисертационния труд. Въз основа резултатите от промишлените експерименти са определени множество от решения на уравнение (100). Функционалната зависимост $Nu = f(Re, \varepsilon_\psi)$ в логаритмични координати е представена чрез линейна корелация на Фиг. 60.



Фиг.60 Отклонение на опитните резултати от регресионното уравнение

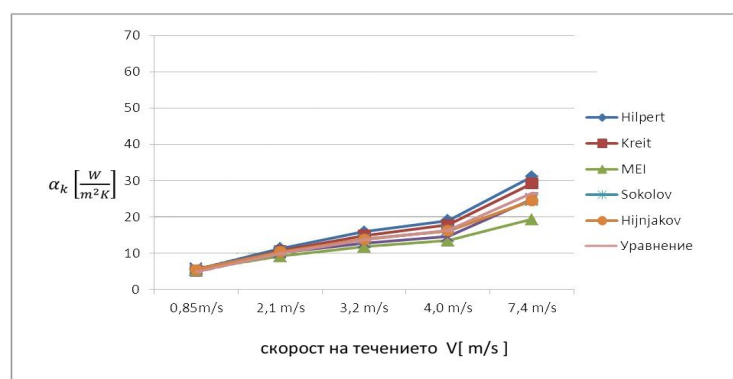
За условията на проведените експерименти в рамките на определените начални и гранични условия (показани в 2.6.3) след антилогаритмуване са определени коефициента и степенния показател на регресионното уравнение което, в натурално изражение добива вида

$$Nu = 0.0275 Re^{0.785} \varepsilon_\psi \quad (103)$$

Достоверността на корелацията се определя от коефициента на детерминация (критерия на **Pirson**) $R^2=0,705$. Уравнението е валидно за стойности на Re от $1,7 \cdot 10^4$ до $46 \cdot 10^4$ и в температурния интервал на проведените експерименти от -8 до $+26^\circ\text{C}$. Няма претенции за всеобхватност и се отнася само за изследваните обекти и конкретните условия. При външна температура $T_0 = 0^\circ\text{C}$, това, регресионното уравнение може да се сведе до по-лесен за практическа употреба вид

$$\alpha_k = 4.5 \frac{v^{0.785}}{D_{0u}^{0.215}} \varepsilon_\psi \quad (104)$$

Възпроизводимостта на резултатите и адекватността на математическия модел (103) са подложени на регресионен анализ. Изчислен е **G**-критерия на **Cochrane** като $G = 0.535 < G_T = 0.6838$. Табличната стойност G_T е определена при степени на свобода $m_2=N=5$ и $m_1=(n-1)=2$, където: N е броя на проведените експерименти при различни атмосферни условия, а n е броя на паралелно извършените измервания. Неравенството $G < G_T$ потвърждава хипотезата за възпроизводимост на резултатите от експеримента с доверителна вероятност 0,95. Адекватността на математическия модел е проверена с **F**-критерия на **Fisher**, като $F = 3.236 < F_T = 3.76$. Табличната стойност F_T е определена при степени на свобода $m_2=N(n-1)=5$ и $m_1=N-L=3$, където L е броя на факторите с висока значимост в регресионното уравнение - в случая $L=2$. Доверителната вероятност е същата – 0,95. На Фиг. 61 са съпоставени стойностите на $\alpha_k \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$, получени чрез уравнение (104) с някои от най-разпространените и най-често използвани аналитични зависимости при еднаква външна температура $T_0 = 0^\circ\text{C}$, за измерените в условията на експеримента скорости на вятъра, при $\varepsilon_\psi=1$.



Фиг.61 Съпоставка на различните аналитични зависимости

От графиките показани на фигурата е видно че, е налице добра сходимост на резултатите при всички разгледани аналитични зависимости при скорости на вятъра до 3,5 m/s. Критериалните уравнения предложени от **Holman**, **Krait** и **MEI** макар и различни по форма дават удивително сходни резултати. В голяма степен това е вярно за **ASTME 680-89** и за уравненията на **Хижняков** и **Соколов**. Поставя се въпроса доколко структурираното на базата на промишления експеримент критериално уравнение (104) дава валидирано достоверни резултати като интегрален (за целия паропровод) коефициент на конвективен топлообмен. Съпоставка с всички останали критериални и емпирични уравнения показва че, при скорост на вятъра под 2m/s резултатите за α_k са леко занижени. При скорости от 3÷5 m/s резултатите са напълно съпоставими. Над 7 m/s различията са осезаеми. Причината за увеличената дисперсия при по-високите скорости най-вероятно се корени в различните условия при които, са провеждани експериментите от различните автори. Възможна причина е разликата във фактическата скорост на вятъра на височината на естакадата и измерената стойност на повърхността. На открити пространства вятъра не е постоянен и се работи с усреднени стойности на скоростта му. При поривист вятър течението има неустановен характер и са налице предпоставки за допълнителни грешки. Най-общо при провеждане на промишлени експерименти в реални производствени условия винаги са налице случайни смущаващи въздействия които, не могат да се предвидят. Все пак доколкото уравнение (104) е получено на базата на конкретен промишлен експеримент при конкретни начални и гранични условия, използването му за конкретните паропроводи е целесъобразно. Удовлетворяването на **G** -критерия на **Cochrane** за възпроизводимост и **F**-критерия на **Fisher** за адекватност, дават основание то да бъде използвано като математически модел за софтуерно определяне на топлинните загубите през трите паропровода в реално време.

От резултатите на този експеримент могат да се направят следните изводи.

1. Проведения експеримент показва че, със стандартна многопикселна термовизионна система е възможно да се заснемат и визуализират инфраграмите, чрез които, може да се направи качествен анализ на състоянието на изолацията и да се визуализират локалните топлинни загуби на промишлени паропроводи. Усъвършенстваната микропроцесорна система в термовизионната система позволява да се изчисли усреднената температура на статичните опори и големи участъци от цилиндричната повърхност на изследвания паропровод.

2. На три реално действащи паропровода с различни диаметри и параметри на парата, са определени топлинните загуби чрез енергиен баланс на топлоносителя и чрез топлинния поток от външната повърхнина на паропроводите. Съпоставката на загубите на топлина дава възможност да се определи усреднена стойност на коефициента на конвективен топлообмен.

3. Чрез метода на най-малките квадрати са определени свободния коефициент и

степенния показател на критериалното уравнение удовлетворяващо началните и граничните условия на експеримента. Уравнението се отнася само за обекта на изследване и няма претенции за универсалност и всеобхватност, независимо че, съпоставката с популярни и често употребявани аналитични зависимости показва добра сходимост на резултатите с някои от тях.

4. Критериалното уравнение (104) може да се използва като математически модел за софтуерни продукти с практическа насоченост за регулярна оценка на топлинните загуби на паропроводите обект на изследването, тъй като удовлетворява напълно **G** - критерия на **Cochrane** за възпроизводимост и **F**-критерия на **Fisher** за адекватност.

5.Разработения метод за експресни оценки на текущите топлинни загуби на паропровода в реално време, като сума от загубите през отделните му компоненти дава като усреднени стойности **9- 12 %** завишени резултати за загубите спрямо енталпийния метод. Голямото му предимство е че, може да се използва селективно за определяне загубите през отделни участъци от паропровода.

6. Определянето на топлинните загуби чрез измерване на повърхностната температура на паропроводите с термовизионна система е приемлив за текущи оценки и има място в инженерната практика, но той не може да замени енталпийния метод който, е нормативно утвърден.

5.4 Резултати и анализ от програмния продукт за определяне топлинните загуби на паропроводи.

За реализирането на логическата схема е използван програмен език R-base. Интерфейса на програмата е показан на Фиг .63

Обект	Дата	L	Tст	Tо	d [m]	V [m/s]	Угъл	ε	Брой опори	Наложение	Qк	Qоп	Q
	5	145.0	25.0	10.0	34.00	90	0.48	76	20		440.38	18.24	554.63

Фиг.63 Интерфейс

В заключение могат да се направят следните изводи:

1. Структуриран е удобен за практическа употреба софтуерен продукт за определяне на топлинните загуби в реално време. Въвеждането му в регулярната практика на топлотехническата лаборатория на Лукойл Нефтохим Бургас е, приложен принос в усъвършенстването на методологията за определяне на топлинните загуби на промишлени паропроводи, чрез използването на термовизионна апаратура.

2. Програмния продукт е предназначен за определянето на загубите на промишлени паропроводи. Модулното структуриране и отворения интерфейс, позволяват да се използва успешно за произволни паропрепращаващи системи за които, са известни компановъчните характеристики на паропроводите и параметрите на топлоносителя.

Заклучение

Създаден е метод за оценка на топлинните загуби от промишлени паропроводи на базата на сумиране на загубите през конкретните конструктивни елементи на паропровода което, е целта на дисертационния труд. Новия метод позволява определянето на топлинните загуби количествено и качествено чрез визуализация на термограмите. Голямото му предимство е че, може да се използва селективно за определяне загубите през отделни участъци от паропровода. Той не заменя нормативно утвърдения

“енталпиен метод”, но двата метода може да се съчетаят и успешно да се прилагат паралелно в инженерната практика. Реализацията му стана възможна след като станаха достъпни измервателни средства позволяващи многопикселно измерване и усредняване на повърхностната температура. С проведените експерименти (два лабораторни и един промишлен), на базата на аналитичната теория на топлообмена и справочна литература поставените задачи произтичащи от поставената цел са решени.

От първия експеримент са определени условията при които, е възможно да бъдат използвани термовизионни измервания на повърхностната температура на промишлени паропроводи с цел определяне загубите по преноса на топлина, но за целта следва се минимизират факторите които, влияят негативно на точността на измерването. Сравнителния анализ показва, че основна грешка се допуска при определянето на $\varepsilon_{\lambda T}$. Това е особено отчетливо при ремонтирани участъци от паропровода, с ново покритие от поцинкована ламарина с висока отражателна способност. При летни температури съществено влияние оказва температурния фон от което, следва че, измерванията трябва да се правят при сухо време и задължително нощем. Максимално допустимо отклонение на обектива спрямо нормалата към измервания участък не трябва да не надвишава 25° . Потвърждават се литературните данни за висока точност на термовизионните измервания при обекти с коефициент на излъчване (степен на чернота) $\varepsilon_{\lambda T} > 0,85$

Съществена част от втория експеримент е определянето на функционална зависимост $\alpha_{\text{оп}} = f(v)$ при $T_0 = \text{const}$, за тънкостенни пространствени тела при известна скорост и посока на вятъра. Посредством метода на „анализ на размерностите“ е получено критериално уравнение, което удовлетворява условията на топлотехническата задача за намиране на топлинния поток от статичните опори на топлопроводите. Уравнението удовлетворява с 95 % достоверна вероятност критериите *Cochrane* и *Fisher* за възпроизводимост и адекватност на резултатите. Създадения математическия модел е много важен етап, без който, не може да се постигне основната цел на настоящия дисертационен труд.

С цел валидиране резултатите от новия метод е извършен промишлен експеримент върху три реално действащи паропроводи на площадката на „Лукойл Нефтохим Бургас“. Съпоставен с нормативно утвърдения “енталпиен метод” дава 9-12 % завишени резултати. Определена е усреднената за целия паропровод стойност на коефициента на топлопредаване към околната среда. Резултата е съпоставен с най-известните и често прилагани в инженерната практика критериални и емпирични уравнения за определянето му.

За улеснение на прилагането на новия метод е структуриран и успешно внедрен в практиката на Топлотехническата лаборатория на „Лукойл Нефтохим Бургас“ инженерно приложим софтуер за улеснено определяне на сумарните топлинни загуби на паропроводи и на отделни участъци от тях разположени върху естакади посредством измерване на повърхностната им температура чрез термовизионна апаратура по новия метод.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно-приложни

1. Дефинирана е възможността загубите на топлина от тръбопроводите да бъде изразена като сума на загуби от отделните конструктивни елементи чрез използване на термовизионна камера. По същество това представлява нов метод за оценка на топлинните загуби който, може да се употребява паралелно с енталпийния.

2. Структурирано и е решено уравнение от безразмерни комплекси на подобие за определяне топлинните загуби в опори посредством метода „анализ на размерностите“.

Математичния израз може да се използва при подобна задача за обекти със сложна конфигурация.

Приложни

3. Определени са условията и факторите които, влияят на точността на измерването на оптико- електронните прибори в реални заводски условия

4. Предложен е софтуерен продукт позволяващ определяне на топлинните загуби на паропроводи и на отделни участъци от тях в реално време

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Калчев Ст., К. Атанасов**, Възможност за определяне на топлинните загуби на паропроводи чрез използване на термовизионна система, сп. “Топлотехника”, кн. 2, 2011, Издателство на ТУ-Варна, стр. 3-6.
2. **Костов П., К. Атанасов; Ст. Калчев, Ч. Николов**, Определяне на топлинните загуби в топлопроводи чрез използване на термовизионна камера, сп. “Топлотехника”, кн. 3, 2012, Издателство на ТУ-Варна, стр. 56-59.
3. **Kalchev St., P. Kostov, Ch. Nikolov, K. Atanasov**, Experimental Determination of the Functional Dependence of the Integral Radiation Coefficient $\bar{\epsilon}$ from the Surface Temperature of the Object in the Long Wavelength Range of the Infrared Spectrum and the Coefficient $\epsilon(\beta)$ to Compensate for the Errors Resulting from the Positioning of the Lens at an Angle to the Frontal Directory to the Object Under Measurement With Thermal Imaging Camera, ANARKUL URDALETOVA ALI RIZA GOKBUNAR DENIZ ZUNGUN, 2018, SOCIO-SCIENTIFIC STRATEGIES
4. **Костов П., Ч. Николов, К. Атанасов; Ст. Калчев**, Възможност за определяне на топлинните загуби в опори чрез термовизионна камера, XIX Научна конференция, ЕМФ‘2014, Сборник доклади Том 1 стр. 186-190, Созопол, 2014г.
5. **Костов П., Ч. Николов, К. Атанасов; Ст. Калчев**, Някои зависимости при определянето на топлинните загуби в статични опори на топлопроводи чрез използване на термовизионна камера, НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ - 2014, том 53, серия 1.2, Русе 2014
6. **Kostov, P., K. Atanasov., St. Kalchev Ch. Nikolov**, Attempt for experimental determination of heat transfer coefficient to the environment from the surface of operating exiting industrial steam pipelines through thermodynamic balance and use of thermal vision camera, Energy System Conference, 14-15 June 2016, QEII Center, Westminster, London, UK
7. **Kalchev St., P. Kostov, Ch. Nikolov, K. Atanasov**, Summarized Results of the Experimental Determination of Heat Losses Through Fixed Supports of Steam Pipelines, International Journal of Economics, Finance and Management Sciences, 2017, <http://www.sciencepublishinggroup.com>, ISSN: 2326-9553 (Print); ISSN; 2326-9561 (Online).

8. **Калчев Ст**, Приложен софтуер за определяне на топлинните загуби на паропровод. сп. "Топлотехника", кн. 1, 2017, Издателство на ТУ-Варна, стр. 13-19.

EXPLORATION OF THERMAL LOADS OF HEAT PIPELINE THROUGH THERMOVISION SUPPORT

Stefan Vasilev Kalchev, M.Sc.

Abstract

A method has been developed for estimating the heat loss from industrial steam pipelines based on the aggregation of loss values from the specific structural elements of the steam pipeline, which is the topic of this dissertation work. The new method allows quantitative and qualitative determination of the thermal loss by visualization of the thermograms. A strong advantage is that it can be used selectively to determine losses over separate sections of the steam pipeline. It does not replace the regulatory "enthalpy method", but the two methods can be combined and successfully applied in engineering practice together in parallel. Its realization became possible with the availability of measuring devices allowing multipixel measurement and averaging of the surface temperature. With the experiments carried out (two in a laboratory and one industrial), based on the analytical theory of heat exchange and reference literature, the assigned tasks arising from the stated objective are solved.

From the first experiment, the conclusion is that there is a major flaw in the determination of $\varepsilon(\lambda T)$. This is particularly apparent in repaired sections of the steam pipeline, with a new coating of galvanized sheet with high reflectance properties. During summer temperatures the ambient temperature influences significantly the data, which requires that the measurements must be made in dry weather and at night. The maximum allowable deviation of the lens angle from the normal orientation to the measured area must not exceed 25°. Literature data for the high precision of thermal imaging at sites with a radiation coefficient (degree of blackness) $\varepsilon(\lambda T) > 0,85$ is confirmed.

An essential part of the second experiment is the determination of the functional dependency $\alpha_{\text{от}} = f(v)$ at $T_0 = \text{const}$ for spatial thin-walled objects with known speed and direction of wind. Implementing the "Dimensional analysis" method a criteria equation is obtained, which satisfies the conditions of the thermotechnic task for calculating the heat flow through the static supports of the heat conduits. The equation is 95% credible for the **Cochrane and Fisher** criteria for reproducibility and adequacy of the results. The development of the mathematical model is a very important stage without which the main purpose of this dissertation can not be achieved.

In order to validate the results of the new method, an industrial experiment was carried out on three active steam pipelines at the site of **LUKOIL Neftohim Burgas**. Between the regulatory "enthalpy method" and the newly developed method, there is a deviation of 9-12% in the results.

A software is available that allows the determination of heat loss from the steam pipelines as well as from their specific sections in real time.