SAT-9.2-1-HT-10

Summarized results of the experimental determination of heat losses through the static supports of steam pipelines

Stefan Kalchev, Petar Kostov, Chavdar Nikolov, Koycho Atanasov

Обобщени резултати от експерименталното определяне на топлинните загуби през статични опори на паропроводи

Стефан Калчев, Петър Костов, Чавдар Николов, Койчо Атанасов

Summarized results of the experimental determination of heat losses through the static supports of steam pipelines: *Summarized are the results of experimental determination of heat losses through the static supports of steam pipelines low, medium and high pressure in "LUKOIL Neftochim Burgas". In a three factorial experiment are certain exponent of the regression equation. For the determination of the coefficient of convection (α) used Newton - Rikhman equation as a third boundary condition. Shown are experimentally obtained equations of α as a function of dimensionless temperature and the speed and angle of wrap the support from airflow.*

Key words: *Static supports, Steam pipeline, Heat losses, Dimensional analysis*

ВЪВЕДЕНИЕ

В две предишни публикации [1], [2] бяха показани възможностите за определяне на топлинните загуби чрез използването на термовизионна камера. В тази връзка метода за определянето на топлинните загуби от топлопроводи в реално време чрез специализиран софтуер, базиран на определянето на топлинния поток преминал от изолираната повърхност на топлопровода, фасонните части и статичните опори към околната среда изглежда перспективен, което дава основание изследванията в тази посока да продължат до успешното валидиране или отхвърляне на метода. В тази връзка съществуват съществени затруднения предизвикани от намирането на удобна за инженерна употреба математическа зависимост за определянето на загубите през статичните опори. На базата на анализ на размерностите [3] беше предложена степенна функция на безразмерни критерии на подобие от вида:

$$\frac{Q}{c} = \left(\frac{\lambda}{\alpha.\delta}\right)^b . \left(\frac{F}{\delta^2}\right)^d . \left(\frac{t_o}{\Delta t}\right)^e \qquad (1)$$

където: $\left(\frac{\lambda}{\alpha.\delta}\right) = \frac{1}{Bi}$, представлява реципрочната стойност на критерия на Био, $\left(\frac{t_o}{\Delta t}\right)$ е безразмерната температура, а $\left(\frac{F}{\delta^2}\right)$ е безразмерен геометричен критерий.

Комплексите от величини в уравнение (1) съдържат основните фактори влияещи върху отведената от опората топлина и имат определен физически смисъл [4]. Лявата част на уравнението добива безразмерен вид чрез групиране на физичните величини със степенен показател единица в спомагателната функция $c = \alpha.\delta^2.\Delta t$ с размерност [W].

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ОБЕКТА

Обектът на изследване е типова статична опора използвана в паропреносната мрежа на „ЛУКОЙЛ Нефтохим Бургас“ АД, използвана в паропроводи от DN300 до

DN600. За експериментално определянето на загубите през опорите в Инженерно-педагогически факултет – Сливен на ТУ – София е конструиран лабораторен модел. Механичната конструкция и електрическата схема на модела са представени в [1]. При доближаваща се в максимална степен до адиабатните условия изолация и стационарен режим на топлопроводност внесената посредством електронагреватели топлина е равна на топлинния поток преминаваш през опората.

ЦЕЛ

Целта е да се изведе достоверна математическа зависимост, която да послужи при създаването на подходящ софтуерен продукт, позволяващ определянето на топлинните загуби през опорите в реално време. От поставената цел произтича задачата на базата на проведения експеримент да се определят степените показатели на регресионното уравнение (1).

МЕТОД НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Касае се за провеждането на топлотехнически експеримент с ортогонално планиране от първи порядък. Известни са няколко научно обосновани метода за обработка данните от експеримента . Най- широко разпространение е получил и най-често се употребява метода на най - малките квадрати. Този метод, както е известно [5], се основава на уравнението:

$$SUM = \sum_{i=1}^{n} (\bar{y}_i - y_i) = \min, \quad (2)$$

където: $\bar{y}_i$ е средно аритметичното експериментално значение на търсената величина, а y_i е нейната стойност съгласно математическия модел. В качеството на физическия модел се използва уравнение (1). За определянето на коефициента на конвективен топлообмен α, [W/(m^2.K)] се използват опитно получени резултати съгласно закона на Нютон –Рихман:

$$Q = \alpha \,.\, F \,.\, (t_W - t_{oc}), \quad (3)$$

където: Q, [W] е определената по опитен път топлинна мощност, F, [m^2] е площта на опората, t_W , [C°] е измерената с термовизионната камера интегрална температура на опората, а t_{oc}, [C°] е температурата на околната среда. Строго погледнато наличието три критерия на подобие в уравнение (1) обуславя извършването на трифакторен експеримент, тоест решенията би следвало да бъдат разположени във факторното пространство на обемна геометрична фигура, но понеже опората на която са провеждани експериментите има фиксирана повърхност и дебелина, безразмерния геометричен критерий $\left(\frac{F}{\delta^2}\right)$ има конкретна стойност $\left(\frac{0{,}221}{0{,}002^2}\right)$ = 55250, което превръща експеримента в двуфакторен, като уравнението на регресия добива вида:

$$\frac{Q}{c} = (55250)^d . \left(\frac{\lambda}{\alpha.\delta}\right)^b . \left(\frac{t_o}{\Delta t}\right)^e . \quad (4)$$

Известно е [6], 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. Доколкото една равнина се дефинира от три точки, задачата е свежда до решението на система от три уравнения, в логаритмични координати.

$$\ln\left(\frac{Q}{c}\right) = d.\ln(55250) + b.\ln\left(\frac{\lambda}{\alpha.\delta}\right) + e.\ln\left(\frac{t_o}{\Delta t}\right). \quad (5)$$

Удобно е да се приложи субституцията $y = \ln\left(\frac{Q}{\alpha.\delta^2.\Delta t}\right)$, $x_1 = \ln\left(\frac{\lambda}{\alpha.\delta}\right)$, $x_2 = \ln\left(\frac{t_o}{\Delta t}\right)$.

Понеже неизвестните са три, задачата се свежда до решението на системата:

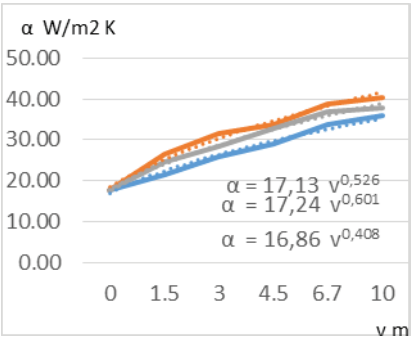
$$\begin{cases} y_1 = d\,10{,}92 + b\,x_{11} + e\,x_{21} \\ y_2 = d\,10{,}92 + b\,x_{12} + e\,x_{22} \\ y_3 = d\,10{,}92 + b\,x_{13} + e\,x_{23} \end{cases}, \qquad (6)$$

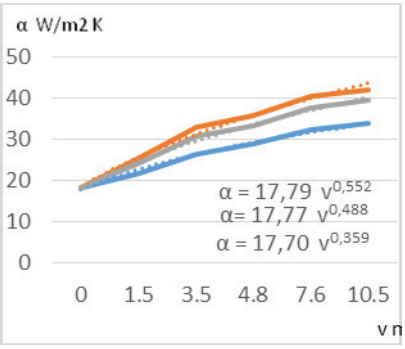
където: y_i и x_{ij} са определените на базата на уравнение (3) по експериментален път усреднени стойности на безразмерните комплекси, докато d, b и e са неизвестните степенни показатели. Трите уравнения се получават въз основа на плана на експеримента. Точността на алгебричния метод зависи от това дали едно от избраните уравнения ще премине през центъра на двуфакторното пространство което в логаритмични координати има ортогонална геометрична интерпретация. Като алтернатива на чисто алгебричния метод при по сложни многофакторни експерименти е възможно да бъде приложен метода на ортогонално планиране с използване на нормализирани фактори [5].

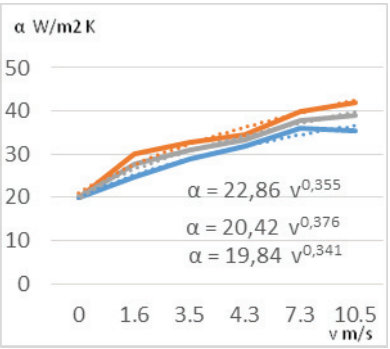
Възпроизводимостта на резултатите и адекватността на математическия модел се проверяват чрез статистическа проверка известна като регресионен анализ. За адекватни се считат тези модели при които се съблюдава еднородност на дисперсията на възпроизводимост и дисперсията на адекватност [4]. Хипотезата за постоянство на дисперсията на експериментално определените резултатите 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 (5), степенните показатели са с висока значимост и не е необходимо да се прави оценка съгласно t – критерия на Student [5].

РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗ

При фиксирани стойности на дебелината на опората δ = 0,002m, площта на изолираната част F = 0,221 m^2, и коефициента на топлопроводност на метала λ = 52 W/(m.K), независимите променливи са коефициента на конвективен топлообмен α (като функция на скоростта на течението) и температурната разлика между интегралната температура на повърхността на опората и околната среда Δt. Експерименталната установка позволява на базата на граничното условие от трети род [6] на уравнението на топлопроводността да се определи по емпиричен път зависимостта α = f(v) в обхват от естествена конвекция при v = 0m/s до ясно изразено турбулентно течение с v = 10m/s. Използвани са три характерни температурни режима за t_o = 183, 205 и 241 °C, отговарящи на температурата на насищане на водната пара в паропроводите ниско, средно и високо налягане съответно 1, 1,5 и 2 [MPa]. Тези температури остават постоянни през целия експеримент. Измерва се консумираната електрическа мощност на нагревателите Q и температурната разлика между температурата на неизолираната повърхност на опората t_w и температурата на околната среда t_{oc} при различни скорости и ъгли на обтичане на въздушното течение. Резултатите в графичен вид са показани на фиг. 1 до фиг. 3. Получените зависимости са апроксимирани като степенна функция.







Фиг.1. α = f(v) при t_o =183 °C
1= $\frac{\pi}{4}$ rad, 2 = $\frac{\pi}{12}$ rad, 3 = $\frac{\pi}{6}$ rad

Фиг.2. α= f(v) при t_o =205 °C
1= $\frac{\pi}{4}$ rad, 2 = $\frac{\pi}{12}$ rad, 3 = $\frac{\pi}{6}$ rad

Фиг.3. α = f(v) при t_o =241 °C
1= $\frac{\pi}{4}$ rad, 2 = $\frac{\pi}{12}$ rad, 3 = $\frac{\pi}{6}$ rad

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. Диапазона на изменение на стойностите на независимите променливи и граничните стойности на топлинните загуби са показани на табл. 1.

Табл.1. Диапазон на изменение на стойностите на независимите променливи

Температура / Нива	183 °C	205 °C	241 °C	Обхват
α_{min}, [W/(m^2.K)]	17,6	18,0	18,2	18,0
α_{max}, [W/(m^2.K)]	40,2	40,8	41,9	42,0
Δt_{min}, [°C]	19,9	21,6	23,5	20
Δt_{max}, [°C]	39,8	45,2	49,7	50
Q_{min}, [W]	77,4	85,9	94,5	80
Q_{max}, [W]	353,6	407,5	460,2	464

Диапазона на изменение на участващите в експеримента критерии на подобие е показан на табл. 2.

Табл.2. Диапазон на изменение на участващите в експеримента критерии на подобие

Крите-рий	Фак-тор	Ниво			Числени стойности на параметрите					Значение	
			δ [m]	F [m^2]	t_0 [°C]	Δt [°C]	λ [W/(m.K)]	v [m/s]	α [W/(m^2.K)]	Крите-рий	ln
$\left(\frac{F}{\delta^2}\right)$	Const.	Горно	0,002	0,221						55250	10,92
		Долно	0,002	0,221						55250	10,92
$\left(\frac{\lambda}{\alpha.\delta}\right)$	x_1	Горно					52	0	18	1444	7,275
		Долно					52	10	42	619	6,428
$\left(\frac{t_o}{\Delta t}\right)$	x_2	Горно			241	20				12,05	2,489
		Долно			183	50				3,66	1,297

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_o за всеки един от двата фактора. Тези „нулеви“ стойности на x_1 и x_2 съгласно [5] определят координатите на централната точка на плана през която минава едно от уравненията на системата (6).

$$x_{1,0} = \frac{x_{1min}+x_{1max}}{2} = \frac{6,428 + 7,275}{2} = 6,852. \quad (7)$$

$$x_{2,0} = \frac{x_{2min}+x_{2max}}{2} = \frac{1,297 + 2,489}{2} = 1,893. \quad (7a)$$

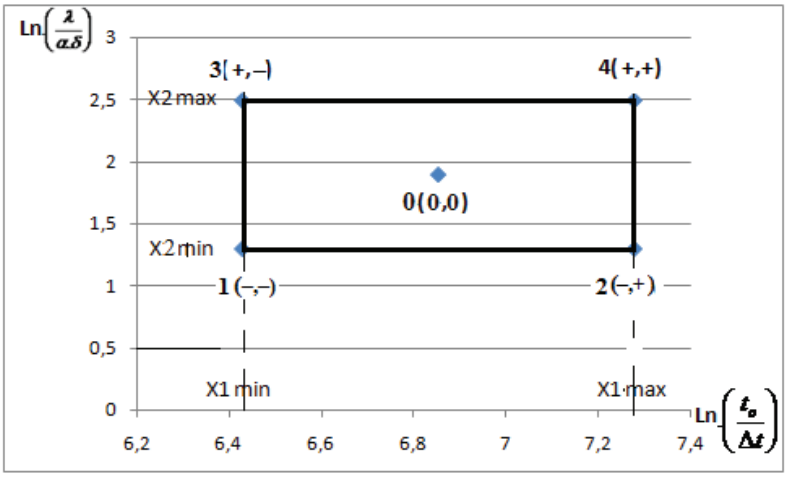
Обхвата на отклоненията е разликата между максималното и минималното логаритмично значение на двата фактора:

$$\Delta x_1 = \frac{x_{1max}-x_{1min}}{2} = \frac{7,275-6,428}{2} = 0,424. \quad (8)$$

$$\Delta x_2 = \frac{x_{2max}-x_{2min}}{2} = \frac{2,489-1,297}{2} = 0,596. \quad (8a)$$

Графичната интерпретация на факторното пространство е показана на фиг.4.

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 равно отдалечени от централната точка. Резултатите са показани в табл. 3.



Фиг.4. Графичен вид на областта на решенията в логаритмични координати

Табл.3. Резултати от опитите в натурално и логаритмично изражение в граничните точки на факторното пространство

N	Значение на критериите		Опитни резултати				Спомагателни логаритмични функции				
	$\left(\frac{\lambda}{\alpha.\delta}\right)$	$\left(\frac{t_o}{\Delta t}\right)$	$\left(\frac{Q}{\alpha\,\delta^2\Delta t}\right)$ 183 °C	$\left(\frac{Q}{\alpha\,\delta^2\Delta t}\right)$ 205 °C	$\left(\frac{Q}{\alpha\,\delta^2\Delta t}\right)$ 241 °C	$\frac{\sum_1^3\left(\frac{Q}{\alpha\,\delta^2\Delta t}\right)}{3}$	$\overline{\overline{y_{12}}}$	X_1^*	X_2^*	$\overline{y_{12}}\,X_1^*$	$\overline{y_{12}}\,X_2^*$
1	619	3,66	42214	48523	54762	49499	10,810	– 1	– 1	– 10,810	– 10,810
2	1444	3,66	55319	55310	55277	55302	10,920	+ 1	– 1	–10,920	–10,920
3	619	12,05	55314	55317	55350	55327	10,921	– 1	+ 1	10,921	10,921
4	1444	12,05	53700	59722	65972	59815	10,999	+ 1	+ 1	10,999	10,999
Σ	0	0					43,65	0	0	0,188	0,190
Резултати в централната точка на плана											
0	***1031,5***	***7,855***	***51637***	***54718***	***57840***	***54986***	***10,912***			***0,0470***	***0,0475***

От теорията на експеримента [4], [5] е известно, че при едновременно изпълнение на четирите гранични условия коефициентите на регресия на математическия модел в логаритмични координати лесно се намира по следните формули, в които N е броят опити, в случая 4.

$$B^* = \frac{1}{N}\sum_1^N \overline{y_{12}}\,.X_1^* = \frac{1}{4}\,0{,}188 = 0{,}0470. \quad (9)$$

$$E^* = \frac{1}{N}\sum_1^N \overline{y_{12}}\,.X_2^* = \frac{1}{4}\,0{,}190 = 0{,}0475. \quad (10)$$

$$D^* = \frac{1}{N}\sum_1^N \overline{y_{12}} = \frac{1}{4}\,43{,}65 = 10{,}912. \quad (11)$$

Регресионното уравнение в логаритмични координати добива вида:

$$y = D^* + B^*\,X_1^* + E^*X_2^*. \quad (12)$$

Чрез обратната трансформация се получават коефициентите на регресия на логаритмичното уравнение (5):

$$b = \frac{B^*}{\Delta x_1} = \frac{0{,}0470}{0{,}424} = 0{,}1108. \quad (13)$$

$$e = \frac{E^*}{\Delta x_2} = \frac{0{,}0475}{0{,}596} = 0{,}0797. \quad (14)$$

$$d = \frac{D* - [\,b\,x_{1,0} + e\;x_{2,0}]}{D*} = \frac{10{,}912 - [0{,}1108\;\;6{,}852\;\;\;\;+0{,}0797\;\;1{,}893]}{10{,}912} = 0{,}9167. \quad (15)$$

Понеже коефициентите на регресия са степенните показатели на натуралното уравнение (4), математическия модел, чрез който може да се определят топлинните загуби през конкретната опора добива вида:

$$\frac{Q}{\alpha.\delta^2.\Delta t} = (55250)^{0{,}9167}.\left(\frac{\lambda}{\alpha.\delta}\right)^{0{,}1108}.\left(\frac{t_o}{\Delta t}\right)^{0{,}0797}. \quad (16)$$

Основните процедури на регресионния анализ са оценка на значимостта на коефициентите на регресия и проверка на хипотезата за адекватност. В случая проверка за значимост на коефициентите не е необходима защото влиянието им е непосредствено. Видно е, резултатите при комбинацията (+ –) и (– +) са много близки и реално съвпадат с центъра на факторното пространство. Това е така, защото двата фактора обуславящи топлообмена с околната среда имат взаимно противоположно действие. С увеличаване на скоростта на въздушната струя факторът x_1 (реципрочната стойност на критерия на Bio) расте, а x_2 (безразмерната температура) намалява и в голяма степен двете въздействия се компенсират взаимно. За адекватни се считат тези математически модели при които се съблюдава условието за еднородност на двете дисперсии – дисперсията за възпроизводимост:

$$S^2_{(y)} = \frac{\sum_1^N n(\bar{Q} - \hat{Q})^2}{N - L} \quad (17)$$

и дисперсията за адекватност:

$$S^2_{(ад)} = \frac{\sum_1^n (Q_{ij} - \bar{Q})^2}{n - 1}, \quad (18)$$

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

$\bar{Q}_i$ - средно аритметичното значение на резултата за всяка i-та точка ограничаваща областта на решенията;

$\hat{Q}_i$ - разчетното значение, определено чрез математическия модел;

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

n - количеството на паралелните опити във всяка i-та точка (в случая 3)

Съпоставка на представителна извадка от експерименталните резултати с прогнозните определени по математическия модел (17) са представени в табл. 4.

За проверка хипотезата за еднородност е направа оценка чрез G – критерия на Cochrane и F – критерия на Ficher

$$G = \frac{S^2_{(y)i.max}}{\sum_1^N S^2_{(y)i}} = \frac{24{,}477}{80{,}448} = 0{,}304 \leq G_{табл} = 0{,}7457, \quad (19)$$

където $S^2_{(y)i.max}$ е максималната регистрирана стойност на средно квадратичното отклонение (ред 9,табл. 4), а $G_{табл}$ е табличната стойност на критерия при доверителна вероятност 0,95 [5]

$$F = \frac{S^2_{(ад)}}{S^2_{(y)i}} = \frac{80{,}448}{94{,}290} = 0{,}853 \leq F_{табл} = 4{,}46, \quad (20)$$

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

Табл.4. Данни за регресионния анализ

N	Резултати								Прогноза	Данни за определяна на дисперсията					
	v $\left[\frac{m}{s}\right]$	**α** $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	t_o [°C]	**Δt** [°C]	Q_{i1} [W]	Q_{i2} [W]	Q_{i3} [W]	$\bar{Q}_i$ [W]	$\hat{Q}$ [W]	Адекв. $(\bar{Q}_i - \hat{Q}_i)^2$	Дисп. $S^2_{(ад)}$.	Възпроизв. $(Q_{ij} - \bar{Q}_i)^2$			Дисп. $S^2_{(y)}$
												J=1	J=2	J=3	
1	0,00	17,6	183	38,6	148	153	149	150,0	152,79	7,7841	11,676	4,00	9,00	1,00	7,00
2	1,50	21,3	183	26,9	162	163	163	162,7	162,85	0,0225	0,034	0,49	0, 09	0, 09	0,67
3	4,60	37,7	184	20,9	172	177	174	174,3	171,79	6,3001	9,450	5,29	7,29	0,09	12,67
4	10,6	51,7	183	15,4	177	178	176	177,0	174,74	5,1076	7,661	0,00	1,00	1,00	2,00
5	0,00	20,0	206	40,7	180	182	179	180,3	181,86	2,4336	2,434	0,09	1,69	18,5	20,27
6	1,60	24,7	205	33,3	181	183	182	182,0	183,19	1,4161	2,124	1,00	1,00	1,00	3,00
7	4,30	31,9	206	26,6	186	188	188	187,3	186,35	0,9025	0,947	1,69	0,49	0,49	2,67
8	10,4	41,9	205	21,1	195	193	196	194,7	191,99	7,3441	11,016	0,09	2,89	1,69	4,67
9	0,00	18,2	241	40,8	200	203	197	200,0	204,28	18,318	27,477	0,00	9,00	9,00	18,00
10	1,50	25,2	241	26,2	206	205	201	204	205,85	3,4225	5,134	4,00	1,00	9,00	14,00
11	4,80	28,9	242	32,4	208	207	205	206,7	207,88	1,3924	2,089	1,69	0,09	2,89	4,67
12	10,5	33,9	241	28,1	210	213	211	211,3	210,48	0,2704	0,406	1,69	2,89	0,09	4,67

Добавянето на геометричния критерий на подобие $\left(\frac{F}{\delta^2}\right)$ на мястото на константата 55250 при същите степенни показатели превръща уравнение (1) във:

$$\frac{Q}{\alpha.\delta^2.\Delta t} = \left(\frac{F}{\delta^2}\right)^{0,9167} . \left(\frac{\lambda}{\alpha.\delta}\right)^{0,1108} . \left(\frac{t_o}{\Delta t}\right)^{0,0797} . \qquad (19)$$

С голяма достоверност може да се предположи, че в този вид решенията на уравнение (18) 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.

ИЗВОДИ

1. На базата на проведени експерименти е намерена функционална зависимост α = f(v) при t_o = const. Апроксимацията на експерименталните криви в степенна функция позволява за аналитично определянето на α за даден температурен режим при известна скорост и посока на вятъра

2. Посредством прилагането на метода на ортогоналното планиране с използване на нормализирани фактори са анализирани резултатите от експеримента и са определени степенните показатели на критериалното уравнение предложено като математическия модел.

3. Уравнението удовлетворява с 95% достоверна вероятност критериите Cochrane и Fisher за възпроизводимост и адекватност на може да се използва като

математически модел за определяне топлинните загуби през статичните опори, като част от по-мащабната задача 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.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Костов П. С., Ч. И. Николов, К. Т. Атанасов, С. В. Калчев, Възможност за определяне на топлинните загуби в опори чрез термовизионна камера, ТУ–София, ЕМФ, XIX НКМУ, Сборник Доклади, Том I, 186-190 , 2014.
[2] Костов, П. С., Ч. И. Николов, К. Т. Атанасов, С. В., Калчев, Някои зависимости при определяне на топлинните загуби в статични опори на топлопроводи чрез използване на термовизионна камера, Научни трудове РУ–2014, том 53, серия 1.2, стр. 57-61.
[3] Huntly, H. E., Dimensional analysis, NY, Dover Publ. Inc., 1967.
[4] Осипова, В. А., Экспериментальное исследование процесов теплообмена, М, Энергия ,1979
[5] Семенов, Б. А., Инженерный Эксперимент в промишленой теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях, ISBN 978-5-7433-2050-9, Саратов, 2009,
[6] Исаченко, П. П. и др., Топлопередача, М., Энергия, 1975.

За контакти:

Инж. Стефан Калчев, Технически университет – София, Инженерно-педагогически факултет – Сливен, тел.: 0889290143, e-mail: skalchevbg@abv.bg

Проф. д-р инж. Петър Стефанов Костов, Технически университет – София, Инженерно-педагогически факултет – Сливен, тел.: 0895586448, e-mail: PStKostov@tu-sliven.com

Гл. ас. д-р инж. Чавдар Иванов Николов, Технически университет – София, Инженерно-педагогически факултет – Сливен, тел.: 0893690870, e-mail: nikolov.chavdar@abv.bg

Доц. д-р инж. Койчо Тончев Атанасов, Технически университет – София, Инженерно-педагогически факултет – Сливен, тел.: 0882270483, e-mail: koycho_atanasov@abv.bg

Докладът е рецензиран.