

## Относно интегралната степен на чернота и интегралната поглъщаща способност на въздуха в обитаеми помещения

Детелин Марков

*On the total emission and total absorption coefficients of the indoor air: presents results about the variation of the total emission and total absorption coefficients of the indoor air as a function of the path-length. The computational procedure developed implements a global model. Calculations are made for 16 typical combinations of the thermodynamic parameters of the indoor air.*

**Key words:** thermal comfort, indoor air, thermal radiation, total emission coefficient, total absorption coefficient.

### ВЪВВЕДЕНИЕ

Количествата на обменената топлина между обитателите и вътрешната среда в едно помещение чрез излъчване и чрез конвекция са съизмерими и би трябвало оценяването на лъчистия топлообмен да бъде възможно най-точно.

Съгласно стандарта ISO 7730:2006, [2], за оценка на обмененото количество топлина между произволен обитател на дадено помещение и заобикалящите го повърхности чрез излъчване е необходимо в центъра на тежестта на неговото тяло (60 см над пода за седящ човек) да бъдат измерени/изчислени посочните температури на облъчване в шест взаимноперпендикулярни посоки, а именно лице-гръб, ляво-дясно и горе-долу. Съгласно най-добрите практики площта на чувствителния елемент на измервателния инструмент за посочна температура на облъчване е  $5 \text{ cm}^2$ .

Съгласно стандарта ISO 7726:1998, [1], в който се дефинират методите и средствата за измерване на физическите параметри на средата, оказващи влияние върху топлинния комфорт на хората в обитаеми помещения, за изчисляване на посочната температура на облъчване ( $T_p$ ) върху малък лицев елемент ( $p$ ), разположен в произволна точка от обема на помещението, в която би могъл да попадне центъра на тежестта на някой обитател, се използва зависимостта

$$T_p^4 = \sum_{n=1}^N T_n^4 F_{n \rightarrow p}, \quad (1)$$

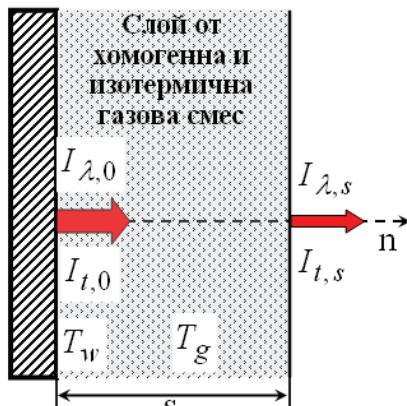
където  $T_n$ , в К, е повърхностната температура на лицевия елемент  $n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) разположен върху някое от огражденията в помещението, а  $F_{n \rightarrow p}$  е ъгловият фактор между този лицев елемент ( $n$ ) и лицевия елемент  $p$ . Очевидно, тази зависимост е валидна само когато всички повърхности в помещението са „абсолютно черни“ и газовата среда в неговия обем е „прозрачна“, т.е. повърхностите не отразяват и/или не пропускат лъчистата енергия, а газовата среда не я абсорбира. В обитаемите помещения първото допускане не винаги е изпълнено, а второто винаги е нарушено, тъй като в състава на вътрешния въздух винаги са налични многоатомни газове водни пари ( $H_2O$ ) и въглероден диоксид ( $CO_2$ ). Както е известно тези газове погълщат и излъчват лъчиста енергия, т.е. преобразуват лъчистата енергия в топлинна и обратно, [6].

Основната цел на настоящата работа е да бъдат оценени интегралната поглъщаща способност ( $\alpha_{t,a}$ ) и интегралната степен на чернота ( $\varepsilon_{t,a}$ ) на въздуха в обитаеми помещения при различни практически възможни съчетания на параметрите, които оказват влияние върху техните стойности. За постигане на тази цел е необходимо да бъде създадена опростена изчислителна процедура за определяне на  $\alpha_{t,a}$  и  $\varepsilon_{t,a}$ , която разглежда въздуха като трикомпонентна смес от прозрачен газ,

$\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ .

### ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

Постановката на задачата е представена на фигура 1. Хомогенен по състав и изотермичен (при  $T_g$ ) слой газ контактува с тръвърда повърхност с температура  $T_w$ . Спектралният посочен интензитет на излъчване от стената по нормалата  $\mathbf{n}$  е  $I_{\lambda,0}$ . На разстояние  $s$  от стената по направление на  $\mathbf{n}$ , вследствие на поглъщането в газовия слой,  $I_{\lambda,0}$  намалява до  $I_{\lambda,s}$ . Аналогично, интегралният посочен интензитет на излъчване  $I_{t,0}$  намалява до  $I_{t,s}$ . Задачата е да бъде определена големината на  $I_{t,s}$  като функция на  $I_{\lambda,0}$ , дебелината на слоя  $s$  и масата на непрозрачните компоненти в слоя, т.е от състава, налягането и температурата на газовата смес.



Фигура 1: Постановка на задачата

Съгласно закона на Кирхоф спектралните коефициенти на поглъщане ( $\alpha_{\lambda,m}$ ) и на излъчване ( $\varepsilon_{\lambda,m}$ ) за всяко непрозрачно вещество ( $m$ ) в газов слой с дебелина  $s$  са равни, а именно  $\varepsilon_{\lambda,m,s} = \alpha_{\lambda,m,s}$ .

За газов слой с дебелина  $s$  от веществото  $m$  спектралната поглъщаща способност се дефинира с израза

$$\alpha_{\lambda,m,s} = \frac{I_{\lambda,0} - I_{\lambda,m,s}}{I_{\lambda,0}} \quad (2)$$

В тази ситуация спектралната степен на чернота се дефинира с израза

$$\varepsilon_{\lambda,m,s} = \frac{I_{\lambda,m,s}}{I_{b,\lambda}} \quad (3)$$

Интегралната степен на чернота се дефинира, съответно, с израза:

$$\varepsilon_{t,m,s} = \left( \int_0^{\infty} I_{b,\lambda} \varepsilon_{\lambda,m,s} d\lambda \right) \left( \int_0^{\infty} I_{b,\lambda} d\lambda \right)^{-1}, \quad (4)$$

където  $\lambda$  е дължината на вълната, а  $I_{b,\lambda}$  е посочният спектрален интензитет на излъчване на абсолютно черно тяло. Интегралната поглъщаща способност се дефинира, съответно, с израза:

$$\alpha_{t,m,s} = \frac{I_{t,0} - I_{t,m,s}}{I_{t,0}} \quad (5)$$

### МЕТОД ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧАТА

Молекулите на  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  поглъщат и излъчват лъчиста енергия само с определени дължини на вълната  $\lambda_i$ , които съответстват на възможните промени в техните квантови енергийни състояния, [6]. Излъчването и поглъщането на лъчиста енергия от тези газове има силно изразен спектрален характер, т.е не е възможно поведението на  $\varepsilon_{\lambda,m}$  и  $\alpha_{\lambda,m}$  при  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  да бъде описано с модела сив газ ( $\varepsilon_{\lambda,m} = \text{const}$ ), [4, 5, 6]. Основните подходи за описание на спектралните ( $\varepsilon_{\lambda,m}$ ,  $\alpha_{\lambda,m}$ ) и интегралните ( $\varepsilon_{t,m}$ ,  $\alpha_{t,m}$ ) характеристики на многоатомни газове, както и на интегралните характеристики на смеси с участие на многоатомни газове ( $\varepsilon_{t,a}$ ,  $\alpha_{t,a}$ )

са систематизирани и представени в [6]. Съществуват четири групи модели за определяне на  $\varepsilon_{t,a}$  и  $\alpha_{t,a}$ : спектрални (Line-By-Line, LBL), лентови (Narrow Band, NB), широколентови (Wide Band, WB) и глобални (емпирични) модели. Пресмятането на  $\varepsilon_{t,a}$  и  $\alpha_{t,a}$  с помощта на първите три групи модели изисква, [7], обемна база данни и интензивни изчисления, което не съответства на целта на настоящата работа. За постигане на нейната цел тук ще бъдат използвани апроксимационни зависимости, а на базата на получените резултати ще бъде определен изчислителния подход, който да бъде използван за отчитане на влиянието на погълщащите/излъчващите свойства на въздуха в помещението върху лъчестия топлообмен между обитателя и заобикалящите го повърхности.

Анализът на специализираната литература [3, 6] показва, че за решаване на поставената по-горе задача най-подходящи са глобалните модели на Leckner [4] и Modak [5], които се използват интензивно в горивната техника. Тук е представен модела на Modak, [5], който е по-точен и е приложим при ниски температури и за малки оптични пътища, Lallement [3].

Интегралната степен на чернота на изотермични и хомогенни смеси от H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> и прозрачен газ се определя от израза, [4, 5]:

$$\varepsilon_{t,a} = \varepsilon_{t,v} + \varepsilon_{t,g} - \Delta\varepsilon_{t,v-g} \quad (6)$$

където  $\varepsilon_{t,a}$ ,  $\varepsilon_{t,v}$  и  $\varepsilon_{t,g}$  е интегралната степен на чернота съответно на сместа, на H<sub>2</sub>O и на CO<sub>2</sub>, а  $\Delta\varepsilon_{t,v-g}$  е корекция заради припокриването на спектралните ленти на H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> при температурата на газа. Интегралната погълщаща способност на газовата смес се определя от израза

$$\alpha_{t,a} = \varepsilon_{t,a} \left( \frac{T_g}{T_w} \right)^{(0.65-0.2\zeta)}, \quad \zeta = \frac{p_v}{p_v + p_g} \quad (7)$$

където  $p_v$  и  $p_g$ , в at, са парциалните налягания на H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> в сместа.

За определяне на интегралната степен на чернота  $\varepsilon_{t,m}$  на H<sub>2</sub>O ( $m=1$ ) и CO<sub>2</sub> ( $m=2$ ) в модела на Modak, [5], се използва следната апроксимационна зависимост:

$$\ln(\varepsilon_{t,m}) = \sum_{i=0}^2 T_{i(x)} \sum_{j=0}^3 T_{j(y)} \sum_{k=0}^3 c_{m,i,j,k} T_k(z) \quad (8)$$

където  $T_{l(\chi)}$  са полиноми на Чебишел от първи род и степен  $l = 0, 1, 2, 3$  с аргумент  $\chi$ , а именно  $T_0(\chi) = 1$ ;  $T_1(\chi) = \chi$ ;  $T_2(\chi) = 2\chi^2 - 1$ ;  $T_3(\chi) = 4\chi^3 - 3\chi$ . Аргументите x, y и z в тези полиноми изразяват зависимостта на  $\varepsilon_{t,m}$  за газов слой от веществото ( $m$ ) с геометрична дебелина ( $s$  в m) от парциалното налягане на веществото ( $p_m$  в at), от оптичната дебелина на газовия слой ( $p_m s$ ) и от температурата на газа ( $T_g$  в K), по

следния начин:  $x = 1 + \frac{\ln(p_m)}{3.45}$ ,  $y = \frac{2.555 + \ln(p_m s)}{4.345}$  и  $z = \frac{T_g - 1150}{850}$ . Стойностите на  $c_{m,i,j,k}$ , за H<sub>2</sub>O ( $m=1$ ) и CO<sub>2</sub> ( $m=2$ ), общо 96 на брой, са представени в [5].

Корекцията от припокриването на спектралните ленти на H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> се пресмята чрез зависимостта предложена в [4], но коригирана по температура:

$$\Delta\varepsilon_{v-g} = \left( \frac{\zeta}{10.7 + 101\zeta} - \frac{\zeta^{10.4}}{111.7} \right) \lg^{2.76} [101.3(p_v + p_g)s] F(T_g) \quad (9)$$

където  $F(T_g) = -0.23469 + 2.2449 \cdot 10^{-3} T_g - 1.0204 \cdot 10^{-6} T_g^2$ .

## РЕЗУЛТАТИ

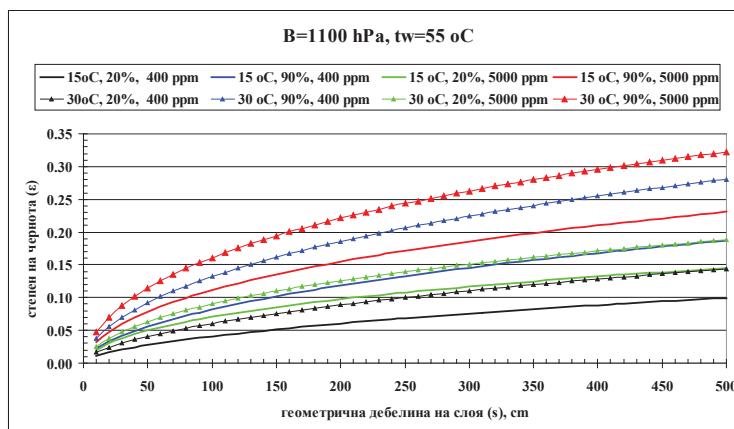
При температура на стената  $t_g = 55^{\circ}\text{C}$  е изследвано изменението на  $\varepsilon_{t,a}$  като функция на дебелина на газовия слой в интервала  $s \in [10, 500]\text{cm}$  със стъпка  $\Delta s = 10\text{ cm}$ . При конкретно съчетание на параметрите на въздуха в помещението, в съответствие с израза 7,  $\alpha_{t,a} = K_\alpha \varepsilon_{t,a}$ . Параметрите на въздуха в помещението за които са оценени границите на интервала на изменение на възможните стойности на  $\varepsilon_{t,a}$ , както и стойностите на  $K_\alpha$ , са представени в Таблица 1. Количество на водните пари във въздуха е зададено чрез относителната влажност (RH), а на CO<sub>2</sub> като обемна концентрация, в съответствие с начина на измерване на тези величини.

Изчислителната процедура, която използва представения по-горе модел е разработена в среда на Maple. Пресмятанията са извършени с 12 значещи цифри.

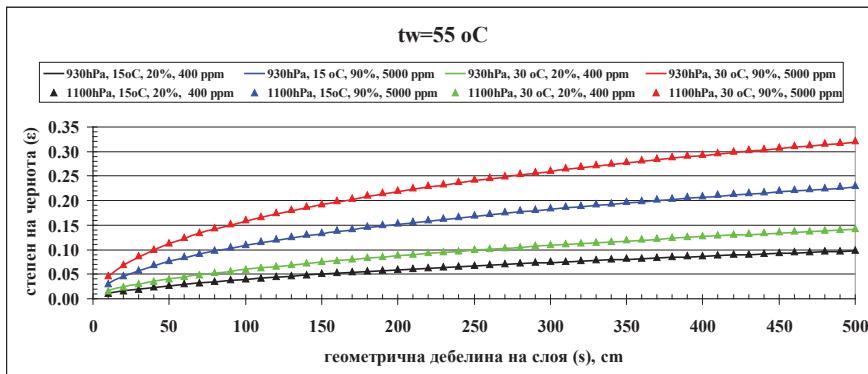
Изменението на  $\varepsilon_{t,a}$  в зависимост от дебелината на газовия слой при атмосферно налягане 1100 hPa е представено на фигура 2. Частично сравнение на резултатите относно изменението на  $\varepsilon_{t,a}$  в зависимост от дебелината на газовия слой при 1100 hPa и 930 hPa е представено на фигура 3.

Таблица 1: Параметри на въздуха в помещението

Входни данни			$P = 1100\text{ hPa}$			$P = 930\text{ hPa}$		
$t_g$ $^{\circ}\text{C}$	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	$P_v$ Pa	$P_g$ Pa	$K_\alpha$ -	$P_v$ Pa	$P_g$ Pa	$K_\alpha$ -
15	20	400	340.7	44.0	0.9404	340.7	37.2	0.9408
15	90	400	1533.2	44.0	0.9425	1533.2	37.2	0.9426
15	20	5000	340.7	550.0	0.9282	340.7	465.0	0.9291
15	90	5000	1533.2	550.0	0.9367	1533.2	465.0	0.9375
30	20	400	848.5	44.0	0.9642	848.5	37.2	0.9643
30	90	400	3818.4	44.0	0.9648	3818.4	37.2	0.9648
30	20	5000	848.5	550.0	0.9590	848.5	465.0	0.9596
30	90	5000	3818.4	550.0	0.9630	3818.4	465.0	0.9633



Фигура 2: Изменение на степента на чернота на въздуха в обитаемо помещение в зависимост от дебелината на слоя при налягане 1100 hPa



**Фигура 3: Влияние на налягането върху степента на чернота на въздуха**

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, въздухът в обитаеми помещения не винаги е прозрачен газ. Изчислителната процедура създава възможност за определяне на степента на чернота и погълщащата способност на въздуха в обитаеми помещения при различно съчетание на определящите ги параметри. Тя дава възможност за оценка на валидността на уравнение 1 във всяка една конкретна ситуация.

Изменението на налягането на въздуха при типичните условия за обитаеми помещения практически не оказва влияние върху стойностите на  $\epsilon_{t,a}$  и  $\alpha_{t,a}$ .

При проектиране на отопителни и охладителни системи, при категоризация на топлинната среда, както и при изследвания свързани с топлинния комфорт на обитателите е необходимо да се оценява влиянието на H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> върху лъчистия топлообмен между обитателите и огражденията за конкретните условия на средата.

### Литература

- [1]. ISO 7726, 1998, Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities.
- [2]. ISO 7730, 2006, Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- [3]. Lallement N., A. Sayre, R. Weber, 1996, Evaluation of emissivity correlations for H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>/air mixtures and coupling with solution methods of the radiative transfer equation. Progress in Energy and Combustion Science, vol. 22, pp. 543 – 574.
- [4]. Leckner B., 1972, Spectral and total emissivity of water vapour and carbon dioxide. Combustion and flame, vol. 19, pp. 33-48.
- [5]. Modak A.T., 1978, Radiation from products of combustion. Fire Research, vol. 1, pp. 339 – 361.
- [6]. Modest M.F., 2003, Radiative heat transfer, Second Edition. Academic Press.
- [7]. Calculation of molecular spectra with the Spectral Calculator, 2015, High resolution spectral modeling, <http://www.spectralcalc.com/info/CalculatingSpectra.pdf>

### За контакти:

гл. ас. д-р инж. Детелин Марков, катедра "Хидроаеродинамика и хидравлични машини", Технически университет - София, тел.: 359 2 965 3305, e-mail: detmar@tu-sofia.bg

Докладът е рецензиран.