

**TEPELNÉ ZAŽAŽENIE OSÔB ZASIAHNUTÝCH SÁLANÍM  
ZO STĹPCA PLAMEŇA**

**Analytická štúdia**

Peter Árendás

<b>1. Úvod, predmet riešenia a východiskové úvahy</b> .....	3
<b>2. Symboly, fyzikálne rozmery a definície používaných veličín a pojmov</b> .....	5
<b>3. Súhrn teoretických poznatkov k predmetu riešenia</b> .....	7
<b>4. Stereometrická interpretácia premenných uhlového súčiniteľa sálania <math>\psi_{12}</math></b>	10
<i>Definícia parametrov viditeľnej plochy žiarenia <math>A_1</math></i> .....	10
<i>Určovanie súradníc ťažísk plôch <math>\Delta A_1</math> a <math>A_2</math></i> .....	12
<i>Určenie dĺžky spojnice <math>r</math> medzi ťažiskami plôch <math>\Delta A_1</math> a <math>A_2</math></i> .....	13
<i>Stanovenie <math>\cos \varphi_1</math> a <math>\cos \varphi_2</math></i> .....	13
<b>5. Algoritmy výpočtu hodnôt <math>\psi_{12}</math> a <math>Q_{12}</math></b> .....	14
<i>Výpočet hodnoty uhlového súčiniteľa sálania <math>\psi_{12}</math></i> .....	14
<i>Výpočet tepelnej záťaže <math>q_2</math> pri zásahu plochy <math>A_2</math> sálavým žiarením z plochy <math>A_1</math></i>	14
<b>Diskusia</b> .....	15
<b>Použité pramene</b> .....	17

## 1. Úvod, predmet riešenia a východiskové úvahy

Štúdia obsahuje popis matematického aparátu, slúžiaceho na výpočet tepelného zaťaženia, ktorému sú vystavené osoby stojace v dosahu sálania stĺpca plameňa s definovanými parametrami.

Na základe poznatkov, získaných z informačných zdrojov [3] – [5] vyplýva, že v danej oblasti sa dajú identifikovať dva smery prístupu k riešeniu naznačeného problému, ktoré spočívajú v použití:

- a) optického princípu s využitím poznatkov o šírení žiarenia v priestore;
- b) termodynamické bilancie sálania tepla.

Pri spracovávaní tejto štúdie bolo rozhodnuté zostaviť matematický aparát a návrh algoritmu výpočtov, vychádzajúci z modelu optického princípu šírenia žiarenia v priestore.

Navrhnuté riešenie úlohy vychádza z nasledovných predpokladov, okrajových podmienok a definícií modelu:

- 1) Plameň je aproximovaný valcovou plochou priemeru  $D$  a výšky  $H$ . Jej základňa sa nachádza vo výške  $h$  nad úrovňou roviny  $x$ - $y$  (pozri Obrázok 4). Veličina  $h$  predstavuje výšku hore otvorenej nádrže, nad ktorou horí plameň. Pokiaľ je  $h=0$ , jedná sa o typický prípad horenia mláky, popísaný v prácach [3],[5].
- 2) Osoba stojaca vo vzpriamenej polohe na rovine svojej základne vo vertikálnej vzdialenosti  $u$  od základne valcovitej nádrže, čelne oproti viditeľnej časti  $A_{1vis}$  plameňa plochy  $A_1$ , má výšku  $v$  a šírku pliec  $p$ , pričom pre celkový obsah ožiarenej plochy  $A_2$  platí nerovnosť  $A_2 \ll A_1$ .
- 3) Stred  $V_0(0,0,0)$  súradnicovej sústavy sa nachádza v rovine základne valcovitej nádrže (pozri napr. Obrázky 4 a 5).

Pre osi  $x$ ,  $y$  a  $z$  takejto sústavy platí pritom nasledovné:

- a) Os  $x$  je totožná so smerom normály  $n_2$  plochy  $A_2$ . Vychádza z bodu  $V_0(0,0,0)$  a má iba kladnú vetvu. Osoba v zmysle bodu 2) sa nachádza vo vzdialenosti  $X \geq D/2$  od zvislej osi  $z$  nádrže a horiaceho stĺpca plameňa;
- b) Os  $y$  je kolmá na smer normály  $n_2$  plochy  $A_2$ . Leží v spoločnej rovine s osou  $x$  a pri prechode bodom bodu  $V_0(0,0,0)$  má kladnú i zápornú vetvu.
- c) Os  $z$  prechádza tiež bodom  $V_0(0,0,0)$  a je totožná s osou hore otvorenej valcovitej nádrže a plameňa nad ňou. V riešenom modeli má kladnú aj zá-

pornú vetvu, čím umožňuje uvažovať polohu základne stojacej osoby nad i pod úrovňou základne valcovitej nádrže.

- 4) Zvislá os vzpriamene stojacej postavy s plochou  $\mathbf{A}_2$  je rovnobežná so zvislou osou  $z$  uvádzanej súradnicovej sústavy  $x$ - $y$ - $z$ .
- 5) Kružnica polomeru  $X$  so stredom v bode  $\mathbf{V}_0(\mathbf{0},\mathbf{0},\mathbf{0})$ , predstavuje množinu bodov možného stanoviska ožiarenej osoby a zároveň reprezentuje izočiaru, na ktorej je táto vystavená účinkom rovnakého tepelného toku  $\mathbf{q}_1$ . Ako to bude ukázané v ďalšej analýze, ich tepelné zaťaženie  $\mathbf{q}_2$  je popri závislosti od údajov tepelného výkonu  $\mathbf{Q}_1$  (resp. tepelného toku  $\mathbf{q}_1$ ) žiarivej plochy  $\mathbf{A}_1$  závislé hlavne od stereometrických pomerov prechodu žiarenia z plochy  $\mathbf{A}_1$  na plochu  $\mathbf{A}_2$ .
- 6) Prezentované úvahy platia za predpokladu, že medzi viditeľnou časťou žiarivej plochy  $\mathbf{A}_1$  a ožiarenou plochou  $\mathbf{A}_2$  sa nenachádza žiadna prekážka, ktorá by tienila voľný priechod žiarivej energie medzi nimi.

## 2. Symboly, fyzikálne rozmery a definície používaných veličín a pojmov

- $\alpha$  - horizontálny polovičný uhol viditeľnej časti plochy  $A_1$  [rad]  
 $\Delta\alpha$  - inkrement uhla  $\alpha$  [rad]  
 $A_1$  - obsah plochy žiariaceho telesa [ $m^2$ ]  
 $A_2$  - obsah plochy telesa absorbujúceho žiarenie [ $m^2$ ]  
 $dA_1$ , resp.  $\Delta A_1$  - inkrementálna plocha žiariaceho telesa [ $m^2$ ]  
 $dA_2$ , resp.  $\Delta A_2$  - inkrementálna plocha telesa absorbujúceho žiarenie [ $m^2$ ]  
 $D$  - priemer nádrže a plameňa [m]  
 $\varphi_1$  - uhol medzi normálou  $n_1$  plochy vyžarujúceho telesa a spojnicou  $r$  [rad]  
 $\varphi_2$  - uhol medzi normálou  $n_2$  plochy ožiareného telesa a spojnicou  $r$  [rad]  
 $H$  - výška plameňa [m]  
 $h$  - výška nádrže [m]  
 $I_n$  - intenzita žiarenia, energia vyžiarená jednotkovou časťou plochy  $dA$  za jednotku času v jednotkovom priestorovom uhle v smere normály  $n$  [ $W/m^2/rad$ ]  
 $I_\varphi$  - intenzita žiarenia, množstvo energie vyžiarenej jednotkovou časťou plochy  $dA$  za jednotku času v jednotkovom priestorovom uhle v smere spojnice  $r$  [ $W/m^2/rad$ ]  
 $\psi_{12}$  - uhlový súčiniteľ sálenia (tvarový faktor), zlomok tepelnej energie prechádzajúcej z plochy  $A_1$  na plochu  $A_2$ , stanovený na základe geometrických úvah. Predstavuje tiež časť plochy  $A_2$ , viditeľnú z plochy  $A_1$  (view factor).  
 $n$  - počet krokov delenia viditeľnej časti plochy  $A_1$  v horizontálnom smere [-]  
 $n_1$  - normála plochy  $\Delta A_1$   
 $n_2$  - normála plochy  $\Delta A_2$   
 $m$  - počet krokov delenia viditeľnej časti  $A_{1vis}$  plochy  $A_1$  vo vertikálnom smere [-]  
 $\pi$  - Ludolfovo číslo,  $\pi = 3,141592\dots$   
 $p$  - šírka plochy  $A_2$  [m]  
 $P_w$  - parciálny tlak vodných pár vo vzduchu [Pa]  
 $Q_1$  - tepelný výkon plochy  $A_1$ , množstvo tepla vyžiareného za jednotku času [W]  
 $Q_{12}$  - korigovaný tepelný výkon  $Q_1$ , zohľadňujúci vzájomnú viditeľnosť žiariacej a ožarovanej plochy [W]  
 $Q_n$  - tepelný výkon v smere normály [W]  
 $Q_{\varphi_1}$  - tepelný výkon v priestorovom uhle  $\varphi_1$  [W]  
 $q_1$  - tepelný tok v smere normály  $n_1$ , tepelný výkon vztiahnutý na plochu  $A_1$  [ $W/m^2$ ]  
 $q_2$  - tepelný tok v smere normály  $n_2$ , smerujúci z plochy  $A_1$  na plochu  $A_2$  [ $W/m^2$ ]  
 $q_m$  - maximálny tepelný tok plameňa [ $W/m^2$ ]  
 $q_\eta$  - maximálny tepelný tok dymovej časti plameňa [ $W/m^2$ ]  
 $r$  - dĺžka spojnice stredov vyžarujúcej  $\Delta A_1$  a ožiarenej inkrementálnej plochy  $\Delta A_2$  [m]  
 $\varrho$  - empirický parameter [ $m^{-1}$ ]  
 $s$  - integračný krok po oblúku uhla  $\alpha$  [m]  
 $T$  - teplota vzduchu [ $^\circ C$ ]  
 $\tau$  - transmisivita tepelnej energie žiarenia cez atmosféru vzduchu [-]  
 $\theta$  - uhol v rovine x-y medzi rovinami inkrementálnych plôch  $\Delta A_1$  a  $\Delta A_2 \perp$  na x-y  
 $t$  - výška inkrementálnej plochy  $\Delta A_1$  [m]  
 $X$  - vodorovná vzdialenosť ožiarenej plochy od zvislej osi nádrže a plameňa, polomer kružnice, vymedzujúcej hodnotu rovnakého korigovaného tepelného výkonu  $Q_{12}$  [m]  
 $x_1$  - súradnica x stredu inkrementálnej plochy  $\Delta A_1$   
 $x_{1\min}$  - minimálna hodnota súradnice x inkrementálnej plochy  $\Delta A_1$  [m]  
 $x_{1\max}$  - maximálna hodnota súradnice x inkrementálnej plochy  $\Delta A_1$  [m]

$x_2$  – súradnica x stredu inkrementálnej plochy  $\Delta A_2$  [m]  
 $y_1$  – súradnica y stredu inkrementálnej plochy  $\Delta A_1$  [m]  
 $y_{1 \min}$  – min. hodnota súradnice y, ktorú nadobúda inkrementálna plocha  $\Delta A_1$  [m]  
 $y_{1 \max}$  – max. hodnota súradnice y, ktorú nadobúda inkrementálna plocha  $\Delta A_1$  [m]  
 $y_2$  – súradnica y stredu inkrementálnej plochy  $\Delta A_2$  [m]  
 $z_1$  – súradnica z stredu inkrementálnej plochy  $\Delta A_1$  [m]  
 $z_2$  – súradnica z stredu inkrementálnej plochy  $\Delta A_2$  [m]  
 $v$  - výška vzpriamene stojacej osoby [m]  
 $u$  – vertikálna vzdialenosť medzi rovinou základne valcovitej nádrže a súbežnou rovinou základne stojacej osoby [m]  
 $\lambda_1$ - kratšie rameno priestorového uhla  $\varphi_1$   
 $\lambda_2$ - kratšie rameno priestorového uhla  $\varphi_2$   
 $V_0$  – stred súradnicovej sústavy  $x - y - z$  uvažovaného modelu  
 $V_1$  – ťažisko inkrementálnej plochy  $\Delta A_1$   
 $V_2$  – ťažisko inkrementálnej plochy  $\Delta A_2$

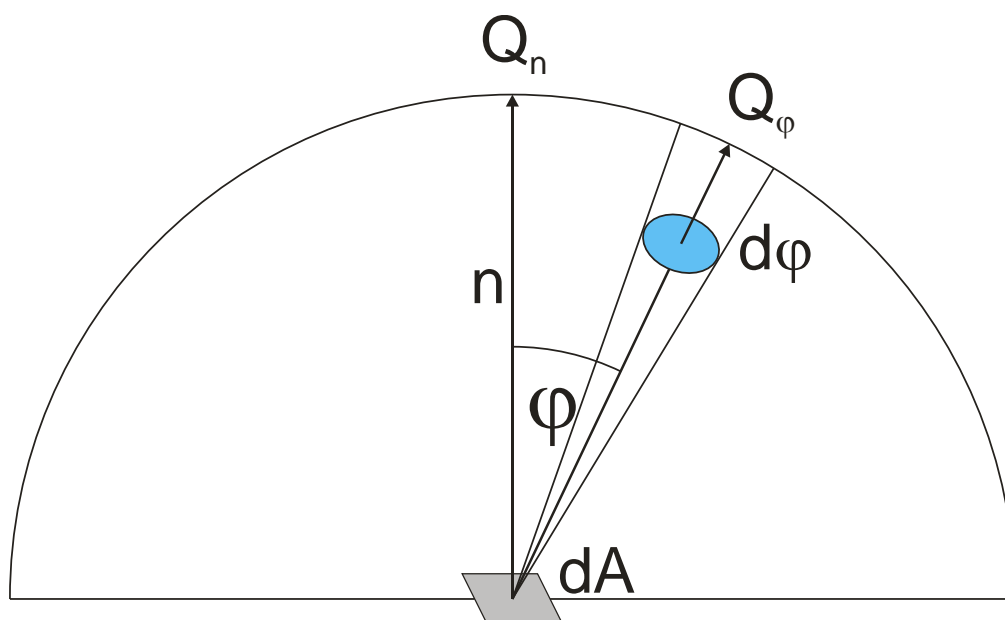
### 3. Súhrn teoretických poznatkov k predmetu riešenia

Žiariaca inkrementálna plocha  $dA$  v zmysle Obrázku 1 vysiela tepelné žiarenie všetkými smermi do polopriestoru nad svojou rovinou. Hodnota maximálneho tepelného výkonu  $Q_n$  v smere normály  $n$  sa s rastúcim uhlom  $\varphi$  znižuje podľa *Lambertovho kosínového zákona*, popísaného rovnicou

$$Q_\varphi = Q_n \cos \varphi \quad [W] \quad (2)$$

Celkový tepelný výkon  $Q_c$ , vyžiarený inkrementálnou plochou  $dA$  do polopriestoru, nachádzajúceho sa nad ňou, je potom

$$Q_c = \pi Q_n \quad [W] \quad (3)$$

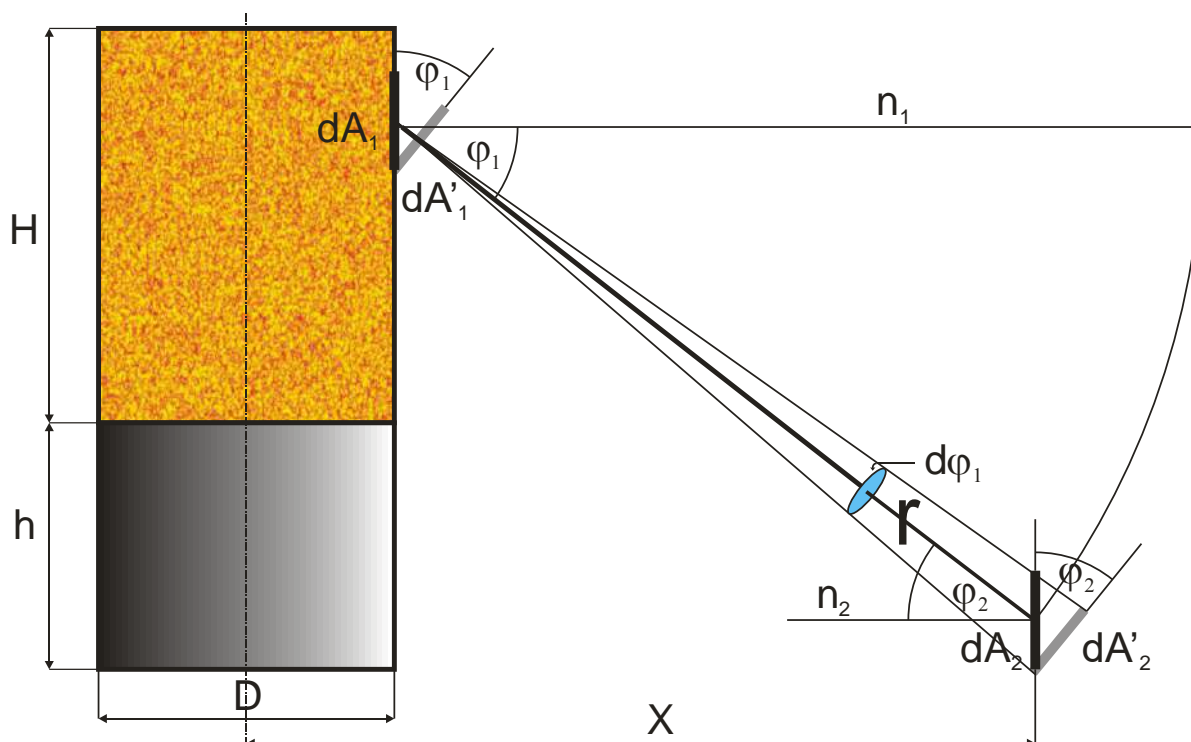


Obrázok 1: Schéma rozloženia žiarenia, vychádzajúceho z elementárnej plochy  $dA$  do plochy polopriestoru na ňou

Ak žiarenie v zmysle Obrázku 2 dopadá z povrchu jednej plochy  $dA_1$  na druhú  $dA_2$  pri ich všeobecnej vzájomnej polohe v priestore, bude množstvo dopadajúceho žiarenia na plochu  $dA_2$  závislé od ich vzájomnej polohy. Pritom platí, že na *vysielaní alebo prijíme žiarenia sa zúčastňujú iba tie časti plôch, ktoré sú z príslušného smeru viditeľné*. Vzhľadom na toto konštatovanie sú predmetné plochy reprezentované ich priemetmi (tieňmi) do roviny kolmej na smer žiarenia (spojnicu  $r$ ).

Aplikáciou princípu, prezentovaného na Obrázku 1, na konkrétne podmienky predmetného riešenia vychádza, že plocha  $dA_2$  je z plochy  $dA_1$  viditeľná pod priestorovým uhlom  $\varphi_1$ . Inkrementálny (jednotkový) priestorový uhol  $d\varphi_1$  je daný vzťahom

$$d\varphi_1 = \frac{dA_2 \cos \varphi_2}{r^2} \quad [\text{rad}] \quad (4)$$



Obrázok 2 Ožiarenie inkrementálnej plochy  $dA_2$  stojacej postavy žiarením, vychádzajúcim z plochy  $A_1$  (plameň nad nádržou), reprezentovanej inkrementálnou plochou  $dA_1$  pri  $u=0$ , kedy platí tiež  $\varphi_1=\varphi_2$

Intenzita žiarenia v smere normály  $I_{n_1}$  je vyjadrená ako množstvo energie, ktorú vyžiari jednotková plocha  $dA_1$  za jednotkový čas v priestorovom uhle  $d\varphi_1$  v zmysle

$$I_{n_1} = \frac{dQ_{n_1}}{d\varphi_1} \quad [\text{W/m}^2] \quad (5)$$

Pritom podľa vzťahu (3), medzi tepelným tokom (žiarivosťou)  $q_1$  plochy  $A_1$  a intenzitou jej žiarenia v smere normály  $I_{n_1}$  existuje vzťah

$$I_{n_1} = \frac{q_1}{\pi} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6)$$

Podľa Lambertovho zákona tiež platí, že intenzita žiarenia v uhle  $\varphi_1$  voči normále  $n_1$  bude daná vzťahom

$$I_{\varphi_1} = I_{n_1} \cos \varphi_1 \quad [\text{W/m}^2] \quad (7)$$



Kombinácie vzťahov (4-7) dostávame výraz pre celkové množstvo energie  $dQ_1$ , ktorú za jednotku času vyžiari plocha  $dA_1$  v jednotkovom priestorovom uhle  $d\varphi_1$  v smere spojnice  $r$  v tvare

$$dQ_1 = I_{\varphi_1} dA_1 = I_{n_1} \cos \varphi_1 dA_1 \quad [W] \quad (8)$$

Na priestorový uhol  $d\varphi_1$  potom pripadne časť  $d^2Q_{12}$  tepelného výkonu  $Q_{12}$ , prenese-ného sálaním z plochy  $A_1$  na plochu  $A_2$ , daný ako

$$d^2Q_{12} = dQ_1 d\varphi_1 = I_{n_1} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} dA_1 dA_2 = q_1 \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad [W] \quad (9)$$

Celkové množstvo tepla  $Q_{12}$ , ktoré za jednotku času vyžiari dokonale čierna plocha  $A_1$  na plochu  $A_2$ , sa vypočíta integráciou rovnice (9) s výsledkom

$$Q_{12} = \frac{q_1}{\pi} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} dA_1 dA_2, \quad [W] \quad (10)$$

pričom pre vzťah tepelného toku  $q_1$  a tepelného výkonu  $Q_1$  platí:

$$q_1 = Q_1/A_1 \quad [W/m^2] \quad (11)$$

Potom rovnicu (10) možno písať aj tvare

$$Q_{12} = \frac{Q_1}{\pi A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} dA_1 dA_2 \quad [W] \quad (12)$$

V súlade s väčšinou uvádzaných prameňov má tzv. uhlový súčiniteľ sálenia (view factor)  $\psi_{12}$  vo vzťahu (12) tvar bezrozmerného výrazu

$$\psi_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_2} \left( \int_{A_1} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dA_1 \right) dA_2 \quad [-] \quad (13)$$

ktorého hodnota sa pohybuje v rozpätí hodnôt  $\Psi_{12} \in \langle 0; 1 \rangle$ . Hodnotu  $\Psi_{12} = 0$  nadobúda vtedy, ak  $\varphi_1$  alebo  $\varphi_2 = \pi/2$ . Naopak, hodnota 1 môže byť výsledkom vzťahu (13) iba vtedy, ak je ožiarené teleso obklopené žiariacim telesom.

Ak prijmeme oprávnený predpoklad, že  $A_2 \ll A_1$ , delenie na inkrementálne plochy  $dA_1$  stačí uvažovať iba v prípade žiariacej plochy  $A_1$ , kým pri ožiarenej ploche  $A_2$  sa vzhľadom na veľký nepomer ich obsahov môže na základe precedensu z práce [5] vychádzať zo zjednodušenia, podľa ktorého je  $\Delta A_2 \cong A_2$ . Rovnicu (10) potom môžeme uvažovať aj v tvare

$$\psi_{12} = \frac{A_2}{\pi A_1} \int_{A_1} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} dA_1 \quad [-] \quad (14)$$

Finálny výpočet, spočívajúci vo vyjadrení tepelnej záťaže  $q_2$  stojacej osoby s plochou tela  $A_2$ , sa nakoniec realizuje pomocou vzťahu

$$q_2 = \frac{Q_{12}}{A_2} \quad [W/m^2] \quad (15)$$

#### 4. Stereometrická interpretácia premenných uhlového súčiniteľa sálania $\psi_{12}$

Na riešenie vzťahu (15) je účelné použiť nasledovný postup:

- Za využitia v úvode definovanej priestorovej súradnicovej sústavy určiť analytické vzťahy pre výpočet hraničných hodnôt súradníc plochy  $A_1$ , ktoré vymedzujú jej časť, viditeľnú z ožiarenej plochy  $A_2$ ;
- Rozdelením takejto časti definovanej plochy  $A_1$  na inkrementálne plochy  $dA_1$  navrhnuť analytické vzťahy na vyjadrenie  $\cos \varphi_1$  a  $\cos \varphi_2$ . Pritom sa vychádza z predstavy, že spojnice  $r$  vychádzajú z ich stredov a všetky sa zbiehajú v ťažisku plochy  $A_2$ .
- Zohľadnením empirických vzťahov na výpočet transmisivity  $\tau$  okolia plameňa, závislej od parciálneho tlaku vodných pár  $P_w$  okolitého vzduchu, ako aj tepelného toku  $q_1$  v smere normály  $n_1$  sa kompletizuje sústava vzťahov, potrebná na získanie hodnoty tepelnej záťaže  $q_2$  osoby, vystavenej účinkom sálavého žiarenia stĺpca plameňa.

##### *Definícia parametrov viditeľnej plochy žiarenia $A_1$*

Hodnotu polovičného uhla  $\alpha$  viditeľnosti žiariacej plochy  $A_1$  z miesta vzdialeného  $X$  od stredu nádrže s polomerom  $D$  definuje vzťah

$$\alpha = \cos^{-1}(D/2X) \quad (16)$$

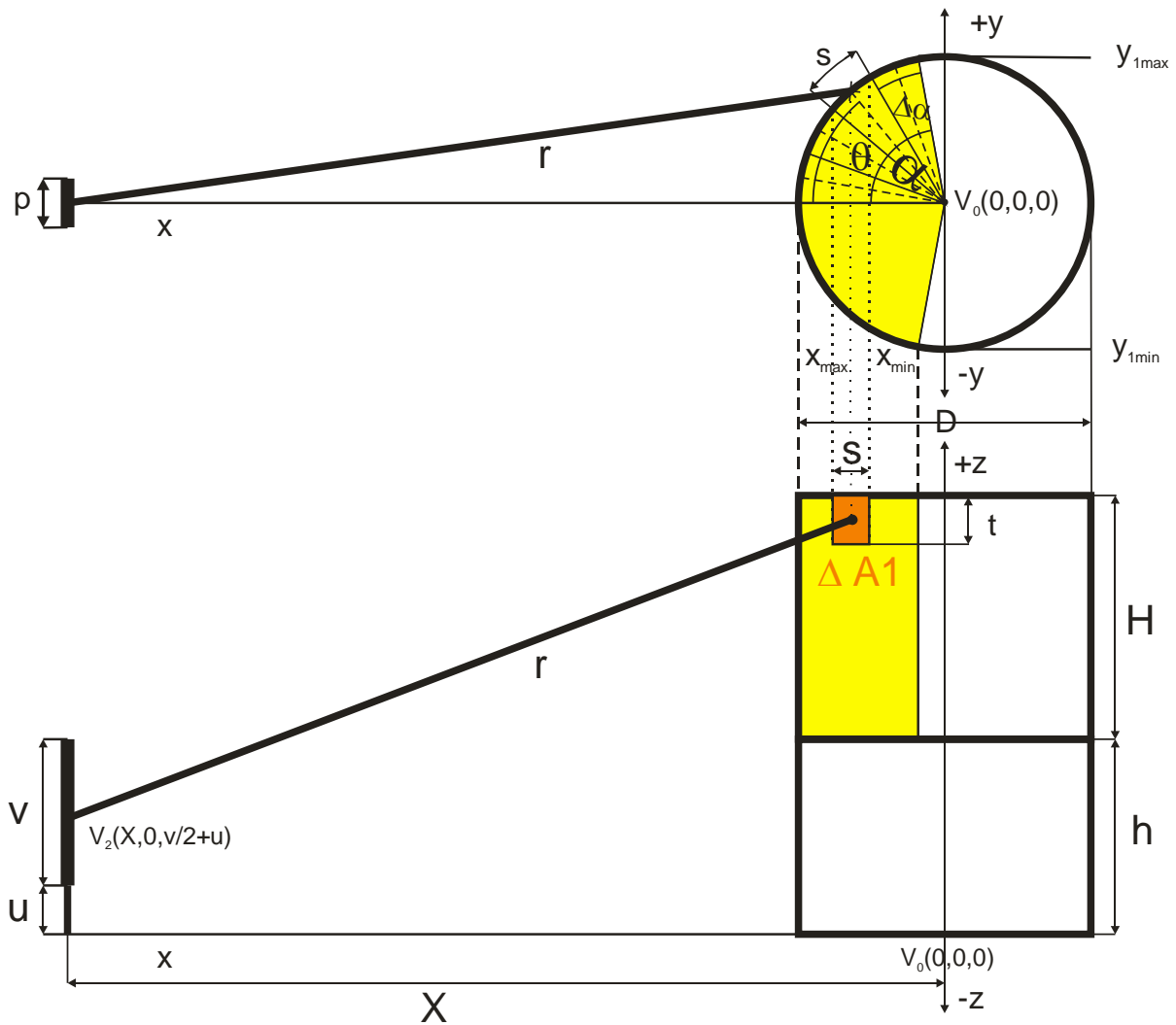
Pri výške plameňa  $H$  hodnotu  $A_1$  následne vyjadruje vzťah

$$A_1 = 2\alpha DH \quad (17)$$

Polovina uhla horizontálnej viditeľnosti  $\alpha$  plochy  $A_1$  z plochy  $dA_2 \equiv A_2$  definuje horizontálne súradnice okrajov oblúka viditeľnosti plochy  $A_1$  v kladnej časti roviny  $x - y$  nasledovnými vzťahmi:

$$\frac{x_{1min}}{D/2} = \cos \alpha \Rightarrow x_{1min} = \frac{D}{2} \cos \alpha \quad (18a)$$

$$\frac{y_{1max}}{D/2} = \sin \alpha \Rightarrow y_{1max} = \frac{D}{2} \sin \alpha \quad (18b)$$



Obrázok 3 Schéma rozdelenia žiarivej plochy  $A_1$  plameňa nad nádržou na jej elementárne plochy  $\Delta A_1$

$$x_{1\max} = \frac{D}{2} \quad (18c)$$

Za účelom ďalšieho postupu realizácie numerickej integrácie elementárnych plôch  $\Delta A_1$  sa po rozdelení celého uhla viditeľnosti  $\alpha$  vhodne zvoleným párnym prirodzeným číslom  $n = 2 \cdot k$ , kde  $k \in \mathbb{N}$ , zavedie veličina jeho inkrementu  $\Delta\alpha$  v podobe

$$\Delta\alpha = \frac{2\alpha}{n}, \quad (19)$$

čomu zodpovedá dĺžka oblúka

$$s = (\Delta\alpha)D \quad (20)$$

Po súčasnom rozdelení výšky plameňa  $H$  na  $m \in \mathbb{N}$  zvolených častí s výškou  $t$  podľa

$$t = \frac{H}{m} \quad (21)$$

V záujme udržania proporcionality  $s:t \sim 1$  rozmerov elementárnej plochy  $\Delta A_1$  je účelné uvažovať so vzájomnou závislosťou hodnôt  $n$  a  $m$  v podobe

$$m = \text{Int}(nH/2\alpha D) \quad (22)$$

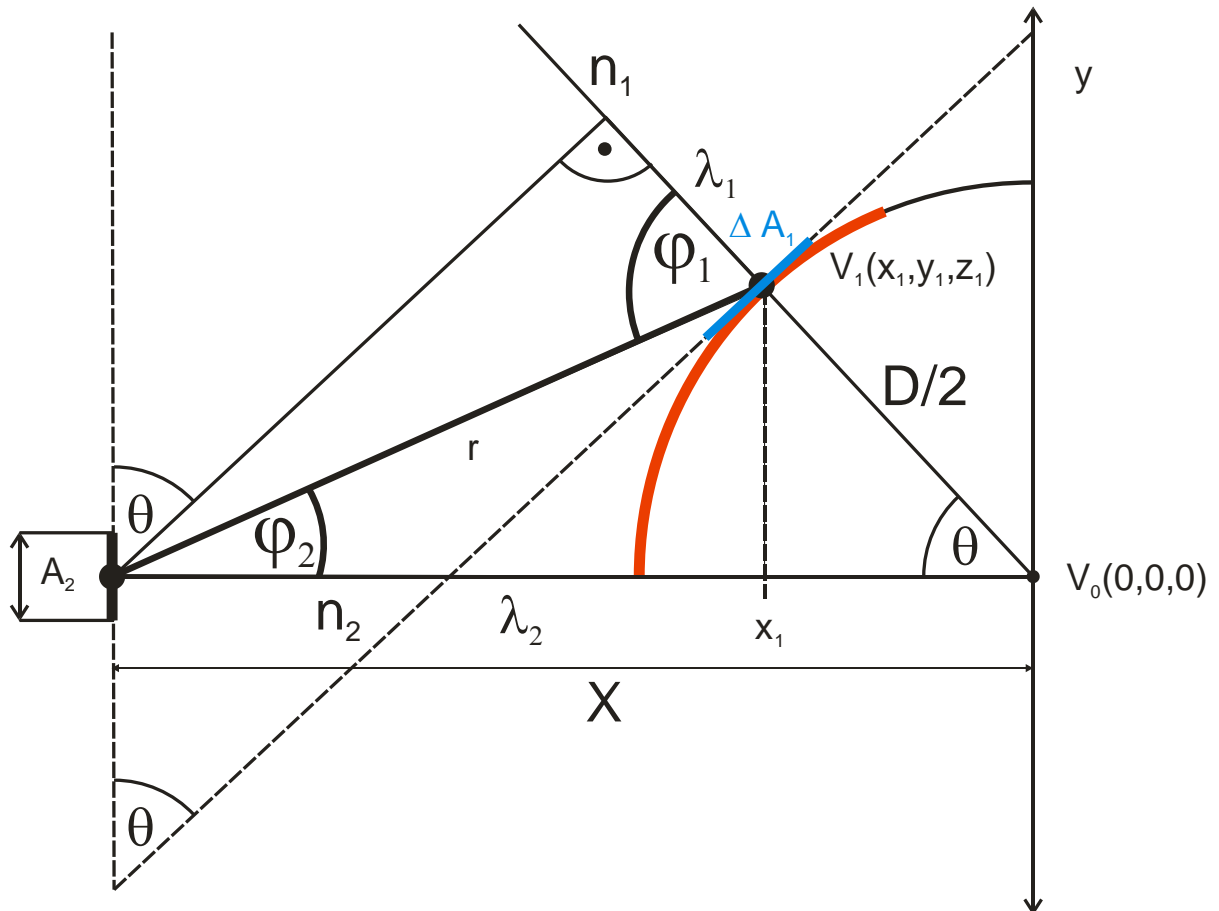
Veľkosť elementárnej plochy  $\Delta A_1$  sa dá vyjadriť ako

$$\Delta A_1 = st, \quad (23a)$$

resp. pri zohľadnení vzťahov (20) až (22), v súlade s logickou nadväznosťou na vzťah (17), v podobe

$$\Delta A_1 = \frac{2\alpha DH}{mn} \quad (23b)$$

Ich hodnoty sú závislé od aktuálnej hodnoty  $\theta_i$  vzájomného uhla ožiarenej plochy  $A_2$  a príslušnej elementárnej plochy  $\Delta A_1$  tak, ako to približuje priložený Obrázok 4.



Obrázok 4 Schéma parametrov vzájomnej polohy ožiarenej plochy  $A_2$  a elementárnej plochy  $\Delta A_1$

#### Určovanie súradníc ťažísk plôch $\Delta A_1$ a $A_2$

Hodnotu uhla vzájomnej polohy predmetných plôch vyjadruje vzťah

$$\theta_i = \frac{\alpha}{n} + (i-1) \frac{2\alpha}{n} = \frac{\alpha}{n} (2i-1), \text{ kde} \quad (24a)$$

$$\theta_i \in \langle \alpha/n; \alpha(n-1)/n \rangle, \text{ } i \in \langle 1; n \rangle \quad (24b)$$

Ťažiská inkrementálnych plôch  $\Delta A_1$  potom z pohľadu horizontálnej roviny x - y nado-  
búdajú na oblúku žiariacej plochy plameňa nasledovné hodnoty:

$$x_{1i} = \frac{D}{2} \cos \theta_i \quad x_{1i} \in \langle x_{1\min}; x_{1\max} \rangle \quad (25)$$

$$y_{1i} = \frac{D}{2} \sin \theta_i \quad y_{1i} \in \langle 0; y_{1\max} \rangle \quad (26)$$

$$z_{1j} = h + \frac{t}{2} + (j - 1)t \quad j \in \langle 1; m \rangle \quad (27)$$

Vzhľadom na zavedenú modelovú predstavu v prípade plochy  $A_2$  platí, že

$$x_2 = X \quad [m] \quad (28a)$$

$$y_2 = 0 \quad [m] \quad (28b)$$

$$z_2 = v/2 + u \quad v > 0, u > 0 \quad [m] \quad (28c)$$

a nakoniec

$$A_2 = pv \quad [m^2] \quad (29)$$

Záporná hodnota  $u$  by predstavovala situáciu, kedy sa ožiarená osoba nachádza pod úroveň roviny základne nádrže s plameňom, s čím však predložený model – aj vzhľadom na jej nereálnosť – nepočíta. Kladné hodnoty  $u$  zase predstavujú prípad stanovišťa osoby nad úrovňou terénu (napr. rebrík, vysokozdvížná plošina a pod.). Záverom k tejto téme platí, že pri zavedenom zjednodušení v zmysle totožnosti  $\Delta A_2 \equiv A_2$  má ťažisko inkrementálnej plochy stále súradnice  $x_2, y_2, z_2$ .

#### *Určenie dĺžky spojnice $r$ medzi ťažiskami plôch $\Delta A_1$ a $A_2$*

Dĺžka ich spojnice  $r_{ji}$  sa dá aproximovať telesovou uhlopriečkou hranola s dvomi nerovnakými bočnými stenami a s dvomi protiľahlými vrcholmi  $V_1$  a  $V_2$ , reprezentujúcimi ťažiská spomenutých inkrementálnych plôch.

$$r_{ji} = \sqrt{(x_2 - x_{1i})^2 + (y_2 - y_{1i})^2 + (z_2 - z_{1j})^2} \quad [m] \quad (30)$$

Pri danej formulácii modelu prichádza reálne do úvahy iba hodnota výsledku s kladným znamienkom.

#### *Stanovenie $\cos \varphi_1$ a $\cos \varphi_2$*

Poznanie hodnôt predchádzajúcich veličín dovoľuje vyjadrenie veľkosti priestorových uhlov  $\varphi_1$ , resp.  $\varphi_2$ , ktoré zvierajú normály  $n_1$  inkrementálnej plochy  $\Delta A_1$ , resp.  $n_2$  plochy  $A_2$  so spojnicou  $r$  a vo všeobecnosti ležia v dvoch rôznobežných rovinách.

Z Obrázka 4 vyplývajú nasledovné vzťahy:

$$\cos \theta_i = \frac{\lambda_{1i} + D/2}{X} \quad (31a)$$

$$\lambda_{1i} = X \cos \theta_i - \frac{D}{2} \quad [m] \quad (31b)$$

$$\cos \varphi_{1i} = \frac{\lambda_{1i}}{r_{ji}} \quad [-] \quad (33)$$

Vyjadrenie hodnoty  $\cos \varphi_2$  je jednoduchšie a udáva ju priamo vzťah, nakoľko

$$\lambda_{2i} = x_2 - x_{1i}$$

$$\cos \phi_{2i} = \frac{\lambda_{2i}}{r_{ji}} \quad [-] \quad (34)$$

## 5. Algoritmy výpočtu hodnôt $\psi_{12}$ a $Q_{12}$

*Výpočet hodnoty uhlového súčiniteľa sálenia  $\psi_{12}$*

Pri uvažovaní zjednodušujúceho predpokladu, že  $dA_2 = A_2$  sa hodnota uhlového súčiniteľa sálenia  $\Psi_{12}$  podľa výrazu (13) a zlúčení so vzťahmi (33,34) dá vyjadriť ako

$$\Psi_{12} = \frac{A_2}{\pi A_1} \int_{A_1} \frac{\lambda_{1i} \lambda_{2i}}{r_{ji}^4} dA_1 \quad [-] \quad (35)$$

Pri voľbe numerického integračného postupu, založeného na metóde sčítavania plochy obdĺžnikov  $\Delta A_1$ , sa výraz (35) transformuje na tvar

$$\Psi_{12} = 2 \frac{A_2 \Delta A_1}{\pi A_1} \sum_{j=1}^m \sum_{i=i}^{n/2} \frac{\lambda_{1i} \lambda_{2i}}{r_{ji}^4} \quad [-] \quad (36)$$

Po zohľadnení vzťahov (22, 23a,b) a splnení podmienky o párnej hodnote  $n$  dostávame výraz

$$\Psi_{12} = \frac{A_2}{\pi n m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=i}^{n/2} \frac{\lambda_{1i} \lambda_{2i}}{r_{ji}^4} \quad [-] \quad (37)$$

*Výpočet tepelnej záťaže  $q_2$  pri zásahu plochy  $A_2$  sálavým žiarením z plochy  $A_1$*

Popri optickom faktore  $\psi_{12}$  vplýva na množstvo prenesenej žiarivej energie medzi uvažovanými dvomi plochami aj priepustnosť  $\tau$  (transmisivita) atmosféry vzduchu. Jej závislosť od obsahu vodných pár, definovaného ich parciálnym tlakom  $P_w$ , je podľa [6] daná vzťahom

$$\tau = 2,02 [P_w \bar{\tau}]^{-0,09} \quad [-] \quad (38)$$

V rozsahu teplôt vzduchu 0-100°C podľa prameňa [8] hodnotu  $P_w$  najpresnejšie udáva Buckova aproximácia, vyjadrená rovnicou

$$P_w = 611,21 \exp \left[ (18,678 - T/234,5) \frac{T}{257,14+T} \right] \quad [Pa] \quad (39a)$$

V teplotnom rozsahu nad 100°C až po kritickú teplotu  $T=372^\circ\text{C}$  sa podľa rovnakého prameňa najlepšie hodí Antoineva poloempirická rovnica v tvare

$$P_w = 10^{[8,14019 - 1810,94/(244,485 + T)]} \quad [\text{Pa}] \quad (39b)$$

Veličina  $\bar{r}$  v rovnici (38) je pritom vyjadrená vzťahom

$$\bar{r} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n r_{ji}}{\frac{n}{2}m} = \frac{2 \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n r_{ji}}{nm} \quad [\text{m}] \quad (39)$$

a predstavuje strednú hodnotu dĺžok všetkých spojnic  $r_{i,j}$  ťažísk inkrementálnych plôch  $\Delta A_1$  s ťažiskom ožiarenej plochy  $A_2$ .

Vzťahom (38) sa modifikuje i finálny výpočet produktu  $Q_{12}$  doterajšieho postupu, ktorý vychádza z výsledku pôvodnej rovnice (12) tým, že ho koriguje o diskutovaný účinok priepustnosti žiarenia v zmysle

$$Q_{12} = Q_1 \psi_{12} \tau \quad [\text{W}] \quad (40)$$

Zároveň zo vzťahu (11) vyplýva hodnota tepelného toku  $Q_1$  z plochy  $A_1$  v podobe

$$Q_1 = q_1 A_1 \quad [\text{W}] \quad (41)$$

V rovnici (41) sa hodnota veličiny  $q_1$  podľa prameňa [5] vypočíta ako

$$q_1 = (q_m - q_\eta) e^{-\rho D} + q_\eta, \quad [\text{W/m}^2] \quad (42)$$

pričom sa použijú parametre<sup>1</sup>  $q_m=140 \text{ kW/m}^2$  pre stĺpec plameňa a  $q_\eta = 20 \text{ kW/m}^2$  pre jeho zadymenú časť, kým  $\rho = 0,12 \text{ m}^{-1}$  predstavuje empirickú konštantu.

Stojaca osoba je potom vystavená tepelnému toku (záťaži)  $q_2$  v zmysle vzťahu

$$q_2 = \frac{Q_{12}}{A_2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (43)$$

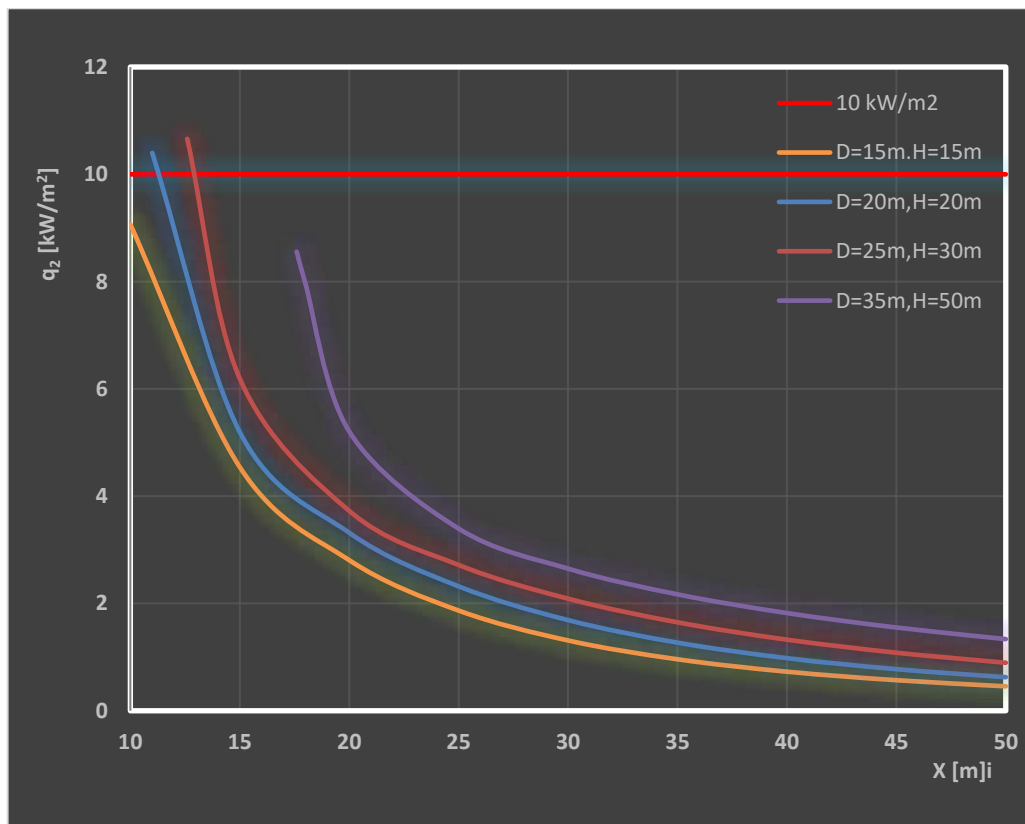
## Diskusia

Odhad hodnôt tepelnej záťaže hasičov takýmto výpočtom v porovnaní s údajmi Fire Experimental Unit [7] môže napomôcť rozhodovaniu o správnom postupe pri protipožiarnom zásahu. Experimentálnymi meraniami boli podľa spomínaného prameňa zistené expozičné časy, počas ktorých môžu hasiči pracovať za určitých hodnôt tepelného žiarenia a teploty vzduchu pri vynaložení adekvátnej fyzickej námahy. Získané hodnoty teplôt vzduchu a tepelného žiarenia tvoria tieto štyri kategórie:

<sup>1</sup> Niektoré údaje parametra  $q_m$  podľa [9], vyjadrené v  $\text{kW/m}^2$ : slnečné svetlo 1, prudké slnko (5 sec) 10, riadené horenie dreva 12.5, samozápal dreva 29, ochranný odev max. 80, prudký plameň 120 – 170. Parameter  $q_\eta$  dosahuje v teplotnom rozpätí 200-500°C hodnoty 1-20  $\text{kW/m}^2$  podľa geometrických podmienok okolia plameňa.

1. *Bežné podmienky* zásahových činností: zvýšená teplota vzduchu pri absencii tepelného žiarenia. Pri stredne namáhavej činnosti môže hasič bez pocitov nepohodlia zotrvať v týchto podmienkach až 30 minút.
2. *Ohrozujúce podmienky*: teplota vzduchu  $120^{\circ}\text{C}$  pri tepelnom zaťažení  $3\text{ kW/m}^2$ . Pokusné osoby odolávali týmto podmienkam viac než 17 minút. Pri teplote vzduchu  $160^{\circ}\text{C}$  a hodnote tepelného zaťaženia  $4\text{ kW/m}^2$  klesla táto doba na 5 minút.
3. *Extrémne podmienky* s potrebou rýchlej akcie a okamžitým ústupom pred náhlym vyšľahnutím plameňa (flash over). Teplota vzduchu môže nadobúdať hodnoty  $160 - 235^{\circ}\text{C}$  pri tepelnom zaťažení  $4 - 10\text{ kW/m}^2$ . Pri horných hraničných hodnotách týchto rozpätí môže hasič pracovať v trvaní maximálne 1 minúty.
4. *Kritické podmienky* pre tepelné zaťaženie presahujúce hodnotu  $10\text{ kW/m}^2$  a teplotu vzduchu nad  $235^{\circ}\text{C}$  predstavujú už ohrozenie života. Za týchto podmienok nie je už zasahovanie hasičov realizovateľné.

Priložený graf predstavuje priebehy závislostí tepelnej záťaže  $q_2$  od odstupu osoby  $X$  od stredu plameňa pri konštantných hodnotách parametrov:  $p=0,5\text{ m}$ ,  $v=2\text{ m}$ ,  $h=0\text{ m}$ ,  $u=0\text{ m}$ ,  $q_m=140\text{ kW/m}^2$ ,  $P_w=9592\text{ Pa}$ ,  $q_\eta=20\text{ kW/m}^2$  a  $\rho=0,12\text{ [m}^{-1}\text{]}$



Obrázok 5 Vybrané závislosti tepelnej záťaže  $q_2$  od odstupu osoby  $X$  od osi plameňa získané za uvádzaných parametrických podmienok



## Použité pramene

- [1] Ilkovič, D.: Fyzika, SVTL Bratislava, 1958, s.699 -702
- [2] Kossaczky, E., Surový, J.: Chemické inžinierstvo I, Alfa Bratislava, 1963, s. 265-269
- [3] Cihelka, J. a kol.: Vytápění a větrání, SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha 1975, s. 80-88
- [4] Jelemenský, L.: Písomná konzultácia, CHT-STU Bratislava, Katedra chemického a biochemického inžinierstva, máj 2004
- [5] Kashef, A., Bénichou, N., Torvi, D., Raboud, D.W., Hadjisophocleous, G., Reid, I.: FIERASystem Enclosed Pool Fire Development Model: Theory Report, National Research Council Canada, Research Report No 121, November 2002, Appendix A, s.1
- [6] Zákon o prevencii závažných priemyselných havárií č.261/2002 Z.z. (učebné texty), Adapt Risk consult s.r.o, Drevársky kongres ZSVTS, Bratislava, s.33
- [7] Chromek, I., Krakovský, A: TECHNICKÉ PROSTRIEDKY PO I., TUZVO, Drevárska fakulta, Katedra požiarnej ochrany, 2002, s.11
- [8] <https://www.omnicalculator.com/chemistry/vapour-pressure-of-water> - získané 5.1.2023
- [9] <https://guides.firedynamicstraining.cahttps://guides.co/g/structural-firefighting-fundamentals-of-fire-and-combustion/118132> - získané 5.1.2023