

# Calculation of critical intensity of radiant flux for definition of fire hazard area using numerical iteration methods and software application

# Výpočet kritické intenzity sálavé tepelné složky pro vymezení požárně nebezpečného prostoru za použití numerických iteračních metod a softwarové aplikace

Václav Petráš 1,\*

<sup>1</sup> Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering, Lumírova 13/630, 700 30 Ostrava-Výškovice, Czech Republic; <u>v.petras@email.cz</u>

\* Corresponding author: v.petras@email.cz

Original scientific paper

Received: June 10, 2019; Accepted: July 02, 2019; Published: July 31, 2019

#### Abstract

The extent of the fire hazard area from open fire areas in the perimeter of structures significantly limits the use of space close to the structure, affects the location of buildings, escape routes, construction economy, structure's use and many other contexts. This generally applies to both new buildings and renovations. The article describes the search for points of fire hazard area boundary more efficiently and for finding a suitable approximation to the critical node with critical intensity at the boundary of the fire hazard area uses advanced mathematical methods and the application of numerical iterative methods for the exact definition of the fire hazard area from the open fire areas. Subsequently, the data were used to create a software tool for the accurate determination of fire hazard areas. Aside from speed and reduction in fire hazard area visible at first glance compared to simplified solution, a giant benefit is also the economic potential in the areas of radiant component impact on persons within escape routes, radiant component impact on flammable materials and structures, EW/EI glass structure plans, determination of mutual building distance, overlap of fire hazard areas on other property or in mutually influencing fire sections.

Keywords: Fire hazard area, radiation, numerical iteration method, Lambert law

## **1** Introduction

The calculation of clearance distances and the definition of the fire hazard area is one of the key tasks of fire prevention with consideration towards the completion of requirements for ensuring the fire safety of buildings. It concerns these areas in particular:

- the impact of radiant component on persons for example within escape routes,
- mutual clearance distances between buildings,

# 1 Úvod

Výpočet odstupových vzdáleností a vymezení požárně nebezpečného prostoru je jeden z klíčových úkolů požární prevence s ohledem na splnění požadavků na zajištění požární bezpečnosti staveb. Jde zejména o tyto oblasti:

- dopad sálavé složky na osoby např. na únikových cestách,
- vzájemné odstupy staveb,

building placement,

Delta

- the impact of radiant component on
- flammable materials and structures,
- mutual influence of fire sections,
- proposal of glass structures (cheaper type
- EW instead of EI),
- the overlap of fire hazard space.

To define the fire hazard area from the open fire areas we use the radiant component as a basis. This component can transfer fire over fairly large distances and threaten for example neighbouring structures, fire sections, escaping persons, animals, etc. The clearance distance from the open fire area is determined using traditional procedure based on the construction system fire risk and the percentage of open fire areas. Subsequentially, the fire hazard area with a potential risk of fire transfer, is defined. If we pass over this practical, simplifying point of view and if we are to prevent fire transfer and the ignition of flammable materials, it is necessary for the intensity of the radiant component to be lower than the critical intensity value. The methodology of defining clearance distances was seen as key already in former Czechoslovakia and was incorporated into norms in the 1970s. Those norms derived knowledge especially from experimental researches abroad. Between years 1976 and 1979 an extensive experimental program aiming to refine the basis for the creation of clearance distance norms also took place at the Research Institute of Structural Engineering in Prague [9]. During these years 45 fire tests in total were realized, 29 of which were aimed at detailed monitoring of the intensity of radiant components from open fire areas [9]. The tests simulated a fully developed fire and records of these tests, as well as numeric simulations, provided valuable knowledge and information. Materials gained by this program were additionally evaluated for several years starting in 1980, and furthermore the methodology for the determination of fire intensity within a burning area, which influences the definition of clearance distances through the radiant component, was refined. Experiments of this magnitude are even today valuable source of information and the basis for the ever more refined defining of fire hazard area using computer technology. Determination of the

umístění staveb,

- dopad sálavé složky na hořlavé materiály a konstrukce,
- vzájemné ovlivňování požárních úseků,
- návrh prosklených konstrukcí (levnější typ EW místo EI),
- přesah požárně nebezpečného prostoru.

vymezení požárně nebezpečného Pro prostoru od požárně otevřených ploch vycházíme ze sálavé složky, která dokáže přenést požár na poměrně velké vzdálenosti a ohrozit tak např. sousední objekty, požární úseky, unikající osoby, zvířata apod. Tradičním postupem se zjistí odstupová vzdálenost od požárně otevřené plochy a to na základě požárního rizika, konstrukčního systému a procenta požárně otevřených ploch. Následně se vymezí požárně nebezpečný prostor ve kterém je potenciální riziko přenesení požáru. pomineme tento Pokud praktický. zjednodušující pohled a pokud máme zabránit přenesení požáru a zabránit vznícení hořlavých materiálů, je nutné, aby intenzita sálavé složky byla nižší než hodnota kritické intenzity. Již v bývalém Československu byla metodika určování odstupových vzdáleností vnímána jako klíčová a začleněna do normativů v 70.letech 20.století. Tehdejší normativy čerpaly poznatky zejména ze zahraničních experimentálních výzkumů. Mezi lety 1976-1979 se i ve Výzkumném ústavu pozemních staveb v Praze realizoval rozsáhlý experimentální program s cílem zpřesnění podkladů pro tvorbu normativů odstupových vzdáleností [9]. V průběhu těchto letech bylo uskutečněno celkem 45 požárních zkoušek z nichž 29 bylo zaměřeno na podrobné sledování a monitoring intenzity sálavé složky od požárně otevřených ploch [9]. Zkoušky simulovaly plně rozvinutý požár a záznam a numerické zkoušek z těchto simulace poskytly cenné poznatky a informace. Podklady získané z tohto programu byly ještě od roku 1980 a v průběhu několika následujících let vyhodnocovány a dále probíhalo zpřesňování metodiky pro určení intenzity požáru v hořícím prostoru, který má vliv na stanovení odstupových vzdáleností prostřednictvím sálavé složky. Experimenty tohoto rozsahu jsou i dnes cenným zdrojem informací a podkladem pro zpřesňující vymezení požárně



border of the fire hazard area was with regard to simplicity of the practical use simplified to a formation marked by a parallel with the open fire area within the established clearance distance, on the sides marked by cylindrical areas with deflection of  $20^{\circ}$  - see Fig.1.

The norms allowed a more detailed determination of the fire hazard area, however with the knowledge that this solution is complicated and very time consuming.

nebezpečného prostoru s využitím výpočetní techniky. Vymezení hranice požárně nebezpečného prostoru bylo s ohledem na jednoduchost praktického použití zjednodušeno na útvar ohraničený rovnoběžkou s požárně otevřenou plochou ve stanovené odstupové vzdálenosti, po stranách ohraničený válcovými plochami s odklonem 20° - viz. Obr.1.

Podrobnější vymezení hranice požárně nebezpečného prostoru normativy připouštěly, ovšem s tím, že jde o řešení složité a časově velmi náročné.



Fig. 1 Simplified determination of the fire hazard area from the open fire area.Obr. 1 Zjednodušené vymezení požárně nebezpečného prostoru od požárně otevřené plochy.

Ι

## 2 Material and Methods

Stefan – Boltzmann law defines radiation intensity as directly proportional to absolute temperature of a body, hence we can express intensity of a radiant component from a burning object as:

#### 2 Materiál a metody

Stefan – Boltzmannův zákon definuje intenzitu sálání přímo úměrnou absolutní teplotě tělesa, pak můžeme intenzitu sálavé složky z hořícího objektu vyjádřit jako:

$$=\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (kW.m^{-2}) \tag{1}$$

where:

ε...body emissivity (-), σ...Stefan-Boltzmann constant 5,67.10<sup>-8</sup> (W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>), *T*...absolute body temperature, i.e..  $T = T_n + 273$  (K),  $T_n$ ..temperature within a burning area (°C).

During a fire, temperature  $T_n$  in a burning area changes as time progresses, usually in the range from approx. 20°C to approx. 1200°C depending on the fire risk, which we normatively express with computing fire load  $p_v$  kde:
ε...emisivita tělesa (-),
σ...Stefan-Boltzmannova konstanta 5,67.10<sup>-8</sup> (W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>),
T...absolutní teplota tělesa.

tj. 
$$T = T_n + 273$$
 (K),  
 $T_n$ ..teplota v hořícím prostoru (°C)

Teplota při požáru v hořícím prostoru  $T_n$  se mění v průběhu času, zpravidla od cca 20°C do cca 1200°C a to v závislosti na požárním riziku, které normově vyjadřujeme [kg.m<sup>-2</sup>] or with equivalent fire duration period  $\tau_e$  [min.].

We can find out the temperature within space and time *t* by performing a detailed gas analysis, using a parametric solution of with the help of simpler nominal scenarios. To establish  $T_n$  we use normative fire scenario – nominal temperature curve ISO 834: výpočtovým požárním zatížením  $p_v$  [kg.m<sup>-2</sup>] nebo ekvivalentní dobou trvání požáru  $\tau_e$  [min.].

Teplotu v prostoru a čase t můžeme získat podrobnou analýzou plynů, parametrickým řešením nebo pomocí jednodušších nominálních scénářů. Pro stanovení  $T_n$ použijeme normový požární scénář – nominální teplotní křivku ISO 834:

$$Tn = 20 + 345. \log_{10}(8t + 1) \quad (^{\circ}C) \tag{2}$$

To establish critical radiation intensity, i.e. the value of radiant component  $I_0$  landing on flammable material, a sample of wood, a common building material, was chosen as a representative. Threshold value  $I_0$  for wood is expressed by value 18,5 kW.m<sup>-2</sup> [9]. The value of critical radiation intensity  $I_0$  differs depending on the desired computation. The value is different for example when computing radiant component towards escaping persons, stored materials, etc., where the  $I_0$  value is lower. After that we search for the distance where the radiation intensity I falls to the value of critical radiation intensity I<sub>0</sub>. Most engineering tasks rest in the solution to so called surface radiator. It represents open fire areas (common filler material such as a window or door). Radiation intensity by itself is then dependent on the shape and mutual positioning of the radiator and the irradiated place. This state is illustrated in Fig.2.

Pro stanovení kritické intensity sálání, tj. hodnoty sálavé složky  $I_0$  dopadající na hořlavý materiál byl jako reprezentant stanoven vzorek dřeva, tedy častý materiál staveb. Mezní hodnota  $I_0$  pro dřevo je vyjádřena hodnotou 18,5 kW.m<sup>-2</sup> [9]. Hodnota kritické intenzity sálání I<sub>0</sub> se liší podle požadovaného výpočtu. Hodnota je odlišná např. při výpočtech sálavé složky vůči unikajícím osobám, skladovanému materiálu apod., kdy je hodnota  $I_0$  nižší. Následně hledáme vzdálenost při které poklesne intenzita sálání I na hodnotu kritické intensity sálání Io. Většina inženýrských úloh spočívá v řešení tzv. plošného zářiče. Ten představuje požárně otevřenou plochu (běžná výplň jako je okno či dveře). Samotná intenzita sálání je následně závislá na tvaru a vzájemné orientaci zářiče a ozařovaného místa. Tento stav znázorňuje Obr. 2.



Fig. 2 Spatial dependence of the radiator and irradiated point in 3D.Obr. 2 Prostorová závislost zářiče a ozářeného bodu ve 3D.



Fig. 3 The relationship between the radiator and irradiated point: (a) Computational model;
(b) Spatial model
Obr. 3 Vztah mezi zářičem a ozařovaným bodem: (a) Výpočtový model; (b) Prostorový model

Radiant component intensity is expressed as I radiant power per spatial angle unit and thus we záři

Intenzita sálavé složky je vyjádřená jako zářivý výkon na jednotku prostorového úhlu a proto můžeme psát:

$$I_0 = \frac{dq}{\cos\theta.dA_1.d\Omega} \tag{3}$$

Then we express radiation power and intensity with following equation:

can write:

Sílu a intenzitu záření pak vyjádříme vztahem:

$$I_0 = \frac{E}{\pi} = \frac{\varepsilon . \sigma . T^4}{\pi} \tag{4}$$

Now we are searching coordinates of a point lying on a curve which defines the border of fire hazard area at known threshold critical value  $I_0$ – see Fig.3. Radiant component intensity around the open fire area in arbitrary point P – Fig.3(a) is expressed in accordance with Lambert law as: Nyní hledáme souřadnice bodu, ležícího na křivce definující hranici požárně nebezpečného prostoru při známé mezní hodnotě kritické  $I_0$  – viz. Obr.3. Intenzita sálavé složky okolo požárně otevřené plochy v libovolném bode P - Obr. 3(a) se vyjádří podle Lambertova zákona jako:

$$I(x, y, z) = \int_{S} \frac{I_0 \cdot cos\Theta}{r^2 dS}$$
(5)



In the following need of a definition of irradiated point *P* we use as a basis variables x,y,z in equation (5), which describe the position of irradiated point *P* and xI, yI define the position of element *dS*. Thus we must find a surface  $\Omega$  where the following applies:

Při následné potřebě definice ozářeného bodu P vyjdeme z proměnných x,y,z ve vztahu (5), které nám popisují umístění ozářeného bodu P a x1, y1 definují pozici prvku dS. Musíme proto najít takový povrch  $\Omega$ , kde platí:

$$I(x,y,z) = Ir, \ pro \ v \check{s}echny(x,y,z) \in \Omega$$
(6)

i.e., I in (x, y, z) for coordinates  $(x, y, z) \in \Omega$ , where Ir is the desired radiant component intensity threshold value see Fig.3. Equation (5) can be rewritten into the following form:

tj. I v(x,y,z) pro souřadnice  $(x,y,z) \in \Omega$ , kde Ir je požadovaná hraniční hodnota intenzity sálavé složky viz. Obr. 3. Rovnice (5) může být přepsána do tohoto tvaru:

$$H(u) = 0 \tag{7}$$

kde u = (x, y, z) a

 $H(u) = I_r - \int_S \frac{I_0 \cdot \cos\theta}{r^2} dS$ 

where 
$$u = (x, y, z)$$
 and

Pro nalezení konkrétního bodu o hledané určité intenzitě využijeme numerické iterační metody. Iterační metody [1], [2], [3] se používají pro širokou škálu výpočtů nelineárních soustav. Většinou se používají pro rovnice tohoto tvaru:

(8)

$$H(u) = 0, \quad H: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^p \tag{9}$$

The principle of iteration method is very simple: to calculate part of a number of solutions close to one solution, then to choose a different solution from this set and to repeat the whole process. In case this new step covers new part of possible solutions, the calculation moves forward. Therefore, the following questions form the basis:

For the determination of a specific point of

searched specific intensity we use numerical

iteration methods. Iteration methods [1], [2], [3]

are used for a broad range of computations of

non-linear systems. They are usually used for

equations of the following form:

- how to calculate possible solutions close to point ui: (F(ui) = 0),
- how to select a new point,
- how to avoid calculating the same part.

Princip iterační metody je velmi jednoduchý: vypočítat část z množství řešení blízkých jednomu řešení, poté vybrat jiné řešení z tohoto souboru a celý proces opakovat. Pokud tento nový krok pokryje novou část možných řešení, výpočet postupuje kupředu. Takže základem jsou otázky:

- jak vypočítat možná řešení blízko bodu
- ui: (F(ui) = 0),
- jak vybrat nový bod,
- jak se vyhnout počítání té samé části.



There are many approaches towards reaching the final, desired solution. Various methods of numerical iteration thus also differ depending on these approaches.When using pseudo arc-length iteration method we can view equations (9) as equations describing the curve precisely defined by an implicit value.

Let's assume that we have a point  $u_0 \in \mathbb{R}^{n+1}$ , therefore  $H(u_0) = 0$ 

Projection *H* represents curve c(s). We will attempt to find point sequence  $u_1$ ,  $u_2$  ... $u_i$ , approaching this curve so that  $|| H(ui) || < \varepsilon$  for sufficiently small  $\varepsilon$ . Let's further assume, that we have a tangent vector  $t_i = t$  (*H*'( $u_i$ )). Curve c(s) is defined here according to Cauchy in the following form: Je mnoho přístupů jak ke konečnému, hledanému řešení dospět. Různé metody numerické iterace se pak podle těchto přístupů i odlišují. Při využití pseudo arc-length iterační metody můžeme rovnice (9) chápat jako rovnice popisující křivku přesně určenou implicitní hodnotou.

Předpokládejme, že máme bod  $u_0 \in \mathbb{R}^{n+1}$ , takže  $H(u_0) = 0$ 

Zobrazení *H* představuje křivku c(s). Zkusíme najít posloupnost bodů  $u_i$ ,  $u_2 \dots u_i$ , přibližujících se této křivce tak, že  $|| H(ui) || < \varepsilon$  pro dostatečně malé  $\varepsilon$ . Dále předpokládejme, že máme tečný vektor  $t_i = t (H'(u_i))$ . Křivka c(s) je zde definována podle Cauchyho ve tvaru:

$$\dot{v} = t\big(H'(u_i)\big) \tag{10}$$

$$v(\theta) = u_{\theta} \tag{11}$$

This task can be solved using predictorcorrector method. We will select indicator of the type Euler in the following form: Tato úloha se může řešit s použitím predictorcorrector metody. Indikátor vybereme typu Euler ve tvaru:

$$\tilde{u}_{i+1} = u_i + ht_i \tag{12}$$

Corrector is of Newton type with the first initial approximate estimation:

Korektor je Newtonova typu s prvním počátečním přibližným odhadem:

$$U^{k+1} = \tilde{u}_{i+1} \tag{13}$$

Because matrix  $H^{\iota}$  is not usually a square matrix, it is not possible to use Newton method in its standard form:

Protože matice H' obvykle není čtvercová matice, není možné použít Newtonovu metodu ve standardním tvaru:

$$F^{k+1} = U^{k} - \left(F'(U^{k})\right)^{-1} F(U^{k})$$
(14)

We need to add an additional equation:

Potřebujeme přidat dodatečnou rovnici:



g

$$(u) = 0 \tag{15}$$

In case of pseudo arc-length iteration the condition is defined as:

This condition expresses the fact that we are finding a new point in a hyperplane perpendicular to a tangent vector. Now we can already write: V případě pseudo arc-length iterace je podmínka definovaná jako:

$$g(u) = \langle u - U^0, t_i \rangle \tag{16}$$

Tato podmínka vyjadřuje skutečnost, že nalézáme nový bod v nadrovině kolmé k tečnému vektoru. Nyní již můžeme napsat:

$$F'(U^{k})(U^{k+1} - U^{k}) = -F(U^{k})$$
(17)

where :

kde :

а

$$F(U) = \begin{pmatrix} H(U) \\ \langle u - U^0, t_i \rangle \end{pmatrix}$$
(18)

and

$$F'(U) = \begin{pmatrix} H'(U) \\ t_i^T \end{pmatrix}$$
(19)

After designation  $\delta = \langle u - U^0, t_i \rangle$ , we receive a set of equations n+1 for n+1 unknown variables in the following form:

Po označení  $\delta = \langle u - U^0, t_i \rangle$  obdržíme soustavu rovnic n + 1 pro n + 1 neznámých ve tvaru:

$$\begin{pmatrix} H'(U^k) \\ t_i^T \end{pmatrix} \delta = - \begin{pmatrix} H'(U^k) \\ 0 \end{pmatrix}$$
 (20)

After resolving this equation set for  $\delta$  we receive the next point as:

Furthermore, we establish new tangent vector

 $t_{i+1}$ . This vector must be perpendicular to

matrix series  $H'(u_{i+1})$  and must keep their direction. This eventually leads to following

Po vyřešení tohoto souboru rovnic pro  $\delta$  dostáváme další bod jako:

$$U^{k+1} = U^k + \delta \tag{21}$$

Dále určíme nový tečný vektor  $t_{i+1}$ .

Tento vektor musí být kolmý k řadám matic  $H'(u_{i+1})$  a musí zachovávat směr. Toto následně vede k souboru rovnic:

$$\binom{H(U_{i+1})}{t_i^T} \bar{t}_{i+1} = -\binom{0}{1}$$
 (22)

equation set:



The last step is bringing the new tangent vector into normal:

Posledním krokem je uvedení do normálu nový tečný vektor:

$$t_{i+1} = \frac{\bar{t}_{i+1}}{\|\bar{t}_{i+1}\|} \bar{t}_{i+1}$$
(23)

Pseudo arc-length method principle and one step is illustrated in Fig.4:

Princip metody Pseudo arc-length a jeden krok zobrazuje Obr. 4:



Fig. 4 Pseudo Arc-length method – principle Obr. 4 Pseudo Arc-length metoda - princip

### **3** Results and Discussion

The Radiation theory is elaborated in scientific publications, for example [6], [7], [8]. Publication [8] in particular and publication [7] partially also served as a basis for Ing. Vladimír Reichl, DrSc, when he elaborated his doctoral thesis and fire safety norms in a part concerning distances. These scientific clearance publications from abroad also served as a basis for domestic publications "Preventing damages" No. 11, 12, 13 by Ing. Vladimír Reichl, DrSc, which are also dedicated to the radiant component and defining of fire hazard area, for example in No. 12, pgs. 47 - 67.

#### 3 Výsledky a diskuse

Teorie sálání je zpracovaná ve vědeckých publikacích např. [6], [7], [8]. Zejména pak publikace [8] a částečně [7] sloužila také jako podklad Ing.Vladimíru Reichlovi, DrSc., při zpracování jeho doktorské práce a normativů požární bezpečnosti v části věnující se odstupovým vzdálenostem. Z těchto vědeckých zahraničních publikací rovněž vycházely domácí publikace Ing. Vladimíra Reichla, DrSc. Zabraňujeme škodám č. 11, 12, 13, kde je věnován prostor sálavé složce a vymezení požárně nebezpečného prostoru, např. v č. 12, str. 47-67.



The basis of these publications is the Stefan – Boltzmann law (1) and Lambert – Kosin law, where:

Základem těchto publikací je Stefan-Boltzmannův zákon (1) a Lambert-Kosinův zákon, kde:

$$dI_0 = dS \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \theta^4 \tag{24}$$



Fig. 5 The relationship between the radiator and the irradiated point in 2D Obr. 5 Vztah zářiče a ozářeného bodu 2D

and furthermore, also for surface S (with constant angle, because of neglectability of changes) in point A' the following relation applies:

a následně i pro plochu S (s konstantním úhlem, pro zanedbatelnost změn) v bodě A' platí:

$$I_0 = I \int_d^S \cos \alpha_2 \, . \, d\beta \tag{25}$$

Because radiation intensity between the radiator and the receiver (points A and A') is dependent on the shape of the object and relative distance, so called position factor  $\Phi$  is introduced and the following relation applies: Protože intenzita sálání mezi zářičem a příjemcem (bodem A a A') závisí na tvaru tělesa a poměrné vzdálenosti, zavádí se t.zv. polohový součinitel  $\Phi$  a platí:







The situation in Fig.6 illustrates a surface containing point A', which is concurrently parallel to the radiator surface (points 1234), thus it applies relation:

Situace na Obr.6 znázorňuje plochu s bodem A', která je rovnoběžná s plochou zářiče (body 1234), pak platí:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 \tag{27}$$

The advantage for practical use lies in the fact, that we can add and subtract position factors. For the situation in **Fig. 6**, the ratios  $h_{u}$ , l,  $d_l$  are deducted like this:

Výhodou pro praktické použití je, že polohové součinitele můžeme sčítat a odečítat. Pro situaci na **Obr. 6** jsou pak dovozeny poměry  $h_{u}$ , l,  $d_1$  takto:

$$X = \frac{h_u}{d_1} \quad a \ Y = \frac{l}{d_1} \tag{28}$$

Furthermore, for the expression of the position factor is applied relation:

Následně pro vyjádření polohového součinitele platí:

$$\boldsymbol{\Phi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \cdot tg^{-1} \cdot \left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}}\right) + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \cdot tg^{-1} \cdot \left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}}\right)\right]$$
(29)

The described procedures are based on searching for the X and Y values in equations (28), respectively the  $d_1$  clearance distance. The calculation is repeated for each case several times until a match between the position factor  $\Phi$  in equations (27) and (29) is found. Considering what was described above, this procedure is very laborious and time consuming.

The article "Calculation of critical intensity of radiant flux for definition of fire hazard area using numerical iteration methods and software application" describes the search for points of fire hazard area boundary more efficiently and for finding a suitable approximation to the critical node with critical intensity at the boundary of the fire hazard area uses advanced mathematical methods. Border element method - BEM is not appropriate due to unknown border and limited usefulness for linear relationships with subsequent density of resulting matrix, which leads to high memory and computational requirements. Final element method - FEM is inappropriate for the purpose of finding correctly converging root due to very small differences. Only numerical iteration methods thus come into consideration.

Uvedené postupy pak spočívají v hledání hodnot X a Y v rovnicích (28), respektive odstupové vzdálenosti  $d_1$ . Pro každý případ se výpočet několikrát opakuje tak, až se dosáhne shody v polohovém součiniteli  $\Phi$  v rovnicích (27) a (29). S ohledem na výše uvedené je tento postup velmi pracný a časově náročný.

Článek "Výpočet kritické intenzity sálavé složky pro vymezení požárně tepelné nebezpečného prostoru za použití numerických iteračních metod a softwarové aplikace" popisuje hledání bodů hranice požárně nebezpečného prostoru efektivněji a pro vhodného přiblížení nalezení k hledanému uzlovému bodu s kritickou intenzitou na hranici požárně nebezpečného prostoru využívá pokročilé matematické metody.

Metoda hraničních prvků-BEM není vhodná z důvodu neznámé hranice a omezené použitelnosti na lineární vztahy s následnou hustotou výsledné matice, což vede na vysokou paměťovou a výpočetní náročnost. Metoda konečných prvků - FEM je k nalezení korektně konvergujícího kořenu nevhodná vzhledem k velmi malým diferencím.



The suitability of a specific mathematical solutions was solved based on publications [1], [2], [3]. Originally two paths of solution, i.e. direct solution methods (for example the Gauss elimination method or modified frontal method) and iteration methods, were narrowed down to only methods of iteration character [3] considering the non - linear conduct of the environment and also taking into account the relatively large memory requirements and low solving speed of direct methods. Equation (9) of used pseudo arc-length method describes a curve precisely defined by the implicit value. The pseudo Arc-length method is used in combination with the Newton method [1] and the solution principle is very good apparent in Fig. 4. The combination of both methods, their practical application (described in the article) and use in software tool leads to high calculation speed and locating the desired point of specific coordinates with the desired critical radiation intensity value (for example 18,5; 15; 12,5; 10 kWm<sup>-2</sup> – depends on the type of calculation). The procedure described in this article was reviewed by calculations and confronted with theory published in [6], [7], [8] and by Ing. Vladimír Reichl, DrSc. and a very good match was found with higher efficiency.

On the basis of described theory and experiments undertaken in the 1970s, software "Sálání" (Radiation) 2018[5] was developed in numerical code Agros2D[4] for the purposes of precise generation of fire hazard area.

Software Sálání (Radiation) 2018 [5] on the basis of entered geometric parameters (the dimensions of open fire area – for example windows), critical intensity (for example 18,5 kWm<sup>-2</sup>), fire scenario – temperature within flaming area  $T_n$  over the course of time (2) in dependence on the entered fire risk  $p_y$  [kg.m<sup>-2</sup>] or  $\tau_e$  [min.], construction system surcharges and entered emissivity generates the boundaries of the fire hazard area, see Fig.7. After clicking on the border of the fire hazard area curve, the coordinates of this point of entered critical intensity are generated – see Fig.7.

Software [5] was among other things used to evaluate and precisely define the fire hazard area from the open fire area of the belt window of the "A" building of the Faculty of civil engineering of VŠB in Ostrava. The results gained from this program allowed for a more efficient solution of planned modifications.

Vhodnost konkrétního matematického řešení byla řešena na základě publikací [1], [2], [3]. Původně dvě možné cesty řešení, tj. přímé metody řešení (např. Gaussova eliminační metoda či modifikovaná frontální metoda) a iterační metody byly zúženy pouze na metody charakteru [3] iteračního vzhledem k nelineárnímu chování prostředí a vzhledem k relativně velkým paměťovým nárokům a pomalosti řešení u metod přímých. Rovnice (9) u použité pseudo arc-length iterační metody nám pak popisuje křivku přesně určenou implicitní hodnotou. Metoda pseudo Arclentgth je použita v kombinaci s Newtonovou metodou [1] a princip řešení je velmi dobře patrný z Obr. 4. Kombinace obou metod, jejich praktická aplikace (popsaná v článku) a využitá v softwarovém nástroji vede k rychlému výpočtovému řešení a nalezení hledaného bodu o konkrétních souřadnicích s požadovanou hodnotou kritické intensity sálání (např. 18,5; 15; 12,5, 10 kWm<sup>-2</sup> – dle typu výpočtu). Postup popsaný v tomto článku byl výpočtově ověřen a konfrontován s teorií publikovanou [6], [7],[8] a Ing.Vladimírem Reichlem DrSc. a bylo dosaženo velmi dobré shody při vyšší efektivitě.

Na základě popsané teorie a experimentů prováděných v 70. letech vznikl v numerickém kódu Agros2D [4] software pro přesné generování požárně nebezpečného prostoru Sálání 2018[5].

Software Sálání 2018 [5] na základě zadané geometrie (rozměrů požárně otevřené plochy – např.okna),kritické intenzity (např.18,5kWm<sup>-2</sup>), požárního scénáře - teploty v hořícím prostoru  $T_n$  v průběhu času (2) v závislosti na zadávaném požárním riziku  $p_v$  [kg.m<sup>-2</sup>] nebo  $\tau_e$  [min.], přirážky na konstrukční system a zadávané emisivitě vygeneruje hranici požárně nebezpečného prostoru Obr. 7. Po kliknutí na hranici křivky požárně nebezpečného prostoru se nám vygenerují souřadnice tohoto bodu o zadané kritické intenzitě – viz Obr. 7.

Software [5] byl použit mimo jiné na posouzení a přesné stanovení požárně nebezpečného prostoru od požárně otevřené plochy pásového okna budovy "A" fakulty stavební VŠB v Ostravě. Výsledky získané tímto programem umožnily ekonomičtější řešení plánovaných úprav.



(Modifications of FAST FAST buildings, VŠB TU Ostrava, PBŘ, Ing. Isabela Bradáčová, CSc.). An example of "Sálání" (Radiation) 2018 [5] software output is shown in Fig. 7. ( Úpravy budov FAST, VŠB TU Ostrava. PBŘ. Ing. Isabela Bradáčová, CSc.). Ukázka výstupu ze software Sálání 2018 [5] je uveden na Obr.7.



Fig. 7 Comparison of fire hazard area defined in detail and in a simplified way – output of "Sálání" (Radiation) 2018 [5] software

**Obr. 7** Porovnání požárně nebezpečného prostoru podrobně a zjednodušeně vymezeného – výstup ze softwarové aplikace Sálání 2018 [5]

It is apparent from Fig. 7 that there is a substantial difference between fire hazard area as defined by normative simplified procedure and area as defined by the detailed procedure, which makes use of advanced mathematical methods. For individual points of the border curve of the fire hazard area as defined by the detailed procedure we seek converging roots coordinates (in 2D or 3D) considering critical intensity of radiant heat, which depends on the type of calculation. Preciseness and smoothness of the border curve is determined by the number of its border points. The long duration of manual calculation is handily replaced by computer technology, which allows for quick generation of the border curve with elected number of points. Another indisputable advantage of the software tool is its quick response to a change in entered calculation parameters such as for example fire risk, size and shape of open fire are, fire scenario type etc.

Z Obr. 7 je patrný podstatný rozdíl mezi požárně nebezpečným prostorem vymezeným normativním zjednodušeným postupem a postupem podrobně vymezeným, který využívá pokročilé matematické metody. U jednotlivých bodů obalové křivky požárně nebezpečného prostoru podrobně vymezeného hledáme konvergující kořeny-souřadnice (ve 2D nebo 3D) vzhledem ke kritické intenzitě sálavého tepla, která je odvislá od typu výpočtu. Přesnost a hladkost hraniční křivky je pak dána počtem jejích hraničních bodů. Časovou náročnost manuálního výpočtu vhodně nahrazuje výpočetní technika, která umožňuje rychlou generaci hraniční křivky o zvoleném počtu bodů. Další nespornou výhodou softwarového nástroje je rychlá odezva na změnu zadávaných výpočtových parametrů jako je např. požární riziko, velikost a tvar požárně otevřené plochy, druh požárního scénáře a pod.



# **4** Conclusion

Scientific benefits described in this article lie in the application of numerical iteration methods for the purpose of precise definition of fire hazard area. Software tool "Sálání" (Radiation) 2018[5], which allows for practical and quick use in practice, was then developed in combination with available experiments.

Practical benefits indisputable are considering the areas mentioned in the introduction of this article. Aside from speed and reduction in fire hazard area visible at first glance compared to simplified solution, a giant benefit is also the economic potential in the areas of radiant component impact on persons within escape routes, radiant component impact on flammable materials and structures, EW/EI glass structure plans, determination of mutual building distance, overlap of fire hazard areas on other property or in mutually influencing fire sections.

## 4 Závěr

Přínosy pro vědu popsané v tomto článku spočívají v uplatnění numerických iteračních vymezení metod pro přesné požárně nebezpečného V kombinaci prostoru. s dostupnými experimenty pak vznikl softwarový nástroj Sálání 2018 [5], který umožňuje praktické a rychlé využití v praxi.

Přínosy pro praktické použití jsou nesporné s ohledem na již uvedené oblasti v úvodu tohoto článku. Kromě rychlosti a na první pohled úspoře požárně nebezpečného prostoru oproti zjednodušenému řešení je obrovským přínosem i ekonomický potenciál v oblastech dopadu sálavé složky na osoby na únikových cestách, dopadu sálavé složky na hořlavé materiály a konstrukce, návrhu prosklených konstrukcí EW/EI, určování vzájemného odstupu staveb, přesahu požárně nebezpečného prostoru na cizí pozemek či při vzájemném ovlivňování požárních úseků.

## **References/Literatura**

[1] ALLGOWER, E., GEORG, K.: Introduction to Numerical Continuation Methods, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2003.

[2] RHEINBOLDT, W. C.: "Numerical continuation methods: a perspective", Journal of Computational and Applied Mathematics, vol. 124, no. 1, pp. 229–244, Dec. 2000.

[3] HENDERSON, E. H.:"Continuation Methods." [Online]. Available: http://www.research.ibm.com/people/h/henderson/Continuation/ Continuation Methods.html. [Accessed: 24-Nov-2017].

[4] KARBAN, P., MACH, F., KUS, P., PANEK, D., DOLEZEL, I.: "Numerical solution of coupled problems using code Agros2D", Computing, Vol. 95, No. 1 Supplement, pp 381–408, DOI 10.1007/s00607-013-0294-4, 2013.

[5] PETRÁŠ V., PANEK, D.: 2. verze software Sálání 2018 pro zpřesněné vymezení požárně nebezpečného prostoru, verze Linux, červen 2018.

[6] JONES, H. R. N.: *Radiation Heat Transfer*, 1 edition. Oxford, New York: Oxford University Press, 2000.

[7] SIEGEL, R.: Thermal radiation heat transfer, 2nd edition. Washington: Hemisphere Pub. Corp, 1981.

[8] HUBBELL, J. H., BACH, R. L., and LAMKIN, J. C.: "*Radiation Field from a Rectangular Source*," J. Research Natl. Bur. Standards, Vol. 64C, 1960.

[9] REICHEL, V.: "Navrhování požární bezpečnosti staveb - Odstupové vzdálenosti", Zabraňujeme škodám, Svazek 16, strana 4-22, SNTL Praha 198.