

Toxicity of Combustion Products of Electrical Cables

Toxicita produktov horenia elektrických káblov

Jozef Martinka^{1,*}, Peter Rantuch¹, Karol Balog¹, Denis Benko¹, Janka Sulová²

¹ Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Materials Science and Technology in Trnava, Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava, Slovakia; jozef.martinka@stuba.sk, peter.rantuch@stuba.sk, karol.balog@stuba.sk, xbenkod@stuba.sk

² VUKI a.s., Rybníčná 38, 831 07 Bratislava 36, Slovakia; sulova@vuki.sk

* Corresponding author: jozef.martinka@stuba.sk

Original scientific paper

Received: May 15, 2018; Accepted: July 04, 2018; Published: July 31, 2018;

Abstract

In the areas of high fire risk, especially assembly occupancies, the most member counties of the European Union require or recommend electrical cables with the minimum reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1. Although the combustion products cause most fire victims, the reaction to fire class does not assess the toxicity of combustion products in any way. Therefore, the toxicity of combustion products of electric cables with reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1 is a widely discussed issue in fire engineering. The aim of the present study is to determine the toxicity of the combustion products of selected electric cables with a reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1. Two CHKE-R J3x1.5 and CHKE-V J3x1.5 power cables, as well as one J-H(St)H control cable, were examined. The cables were tested on a cone calorimeter in a horizontal position at a heat flux of 50 kW.m⁻². The cone calorimeter and test procedure were in accordance with ISO 5600-1:2015. The toxicity of the combustion products was expressed by the critical ratio of the length of the burning cable to the volume at which the combustion products were dispersed and the fractional effective dose reached 0.3 in less than 1,800 seconds. Examined electrical cables showed a given ratio in the range of 1:1.5 to 1:2 m.m⁻³.

Keywords: combustion products; electrical cable; fire risk assessment; fractional effective dose; toxicity

1 Introduction

Toxicity of combustion products is the most significant negative impact of the fire. According to scientific works [1-4], combustion products are the cause of most (50 to 90%) of the victims of fire.

Combustion products show a high risk especially in areas with high density of occupancy by persons (especially meeting place and evacuation routes), in areas with occurrence of children (particularly nurseries) and in health facilities (particularly anaesthesiology-resuscitation department and intensive care unit). An important source of combustion products in these areas are electrical cables.

1 Úvod

Toxicita produktov horenia je najvýznamnejším negatívnym dopadom požiaru. Podľa vedeckých prác [1-4] sú produkty horenia príčinou väčšiny (50 až 90 %) obetí požiaru.

Produkty horenia predstavujú vysoké riziko najmä v priestoroch s vysokou hustotou obsadenia osobami (najmä zhromažďovacie priestory a únikové cesty), v priestoroch s výskytom detí (hlavne jasle a škôlky) a v zdravotníckych zariadeniach (najmä anesteziologicko-resuscitačné oddelenia a jednotky intenzívnej starostlivosti). Významným zdrojom produktov horenia v týchto priestoroch sú elektrické káble.

STN 92 0203:2013 [5] requires in most areas with high fire risk for the lives and health of persons the use of electric cables with minimum reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1. Similarly technical regulations TP 13/2015 [6] requires almost all electrical cables in tunnels minimum reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1. Electric cables with the reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1 are currently the most used in the Slovak Republic in areas with high fire risk for persons. At the same time, according to [7] prepared amendment to the federal state building regulations in the Federal Republic of Germany, so that virtually in all areas of high fire risk to persons may be used only electric cables with minimum reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1. The same approach is expected in virtually all the member countries of the European Union.

The reaction to fire class of the electric cable quantifies its contribution to the development of the fire. Additional classification for smoke production reflects the optical density of the smoke, the additional classification for burning droplets quantifies the burning drops falling from the electric cable during a fire and the additional classification on the acidity of combustion products quantifies the acidity of the distilled water into which the combustion products are captured. The issue of the reaction to fire class of construction products is described in more detail in the scientific paper [8]. However, the reaction to fire class and the additional classifications do not in any way assess the toxicity of the combustion products. It has not yet been published scientific work investigating the toxicity of combustion products of electric cables with reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1. Data on the toxicity of combustion products are particularly important for fire engineering (mainly for calculating the toxicity of combustion products in space and available safe egress time). This issue is described in detail in scientific papers [9-12].

The toxicity of combustion products is expressed by fractional effective dose (FED). The fractional effective dose depends on the concentration of the main combustion products (especially carbon monoxide, hydrogen cyanide, hydrogen compounds, carbon dioxide, and oxygen concentration decrease). FED

Technická norma STN 92 0203:2013 [5] vyžaduje vo väčšine priestorov s vysokým požiar- nym rizikom pre životy a zdravie osôb použí- vanie elektrických káblov s triedou reakcie na oheň minimálne B2_{ca}, s1, d1, a1. Rovnako technický predpis TP 13/2015 [6] vyžaduje takmer pre všetky elektrické káble v tuneloch triedu reakcie na oheň minimálne B2_{ca}, s1, d1, a1. Elektrické káble s triedou reakcie na oheň B2_{ca}, s1, d1, a1 sú teda v súčasnosti v Slovenskej republike najpoužívanejšie v priestoroch s vysokým požiar- nym rizikom pre osoby. Súčasne sa podľa [7] pripravuje novelizácia federálnych štátnych stavebných predpisov v Spolkovej republike Nemecko, tak, aby prakticky vo všetkých priestoroch s vysokým požiar- nym rizikom pre osoby mohli byť používané len elektrické káble s triedou reakcie na oheň minimálne B2_{ca}, s1, d1, a1. Rovnaký postup je očakávaný prakticky vo všetkých členských štátoch Európskej únie.

Trieda reakcie na oheň elektrického kábla kvantifikuje jeho príspevok k rozvoju požiaru. Doplnková klasifikácia na tvorbu dymu vyjad- ruje optickú hustotu dymu, doplnková klasifi- kácia na tvorbu horiacich kvapiek kvantifikuje horiace kvapky opadávajúce z elektrického kábla počas požiaru a doplnková klasifikácia na kyslosť produktov horenia kvantifikuje kyslosť destilovanej vody, do ktorej sú zachy- tené produkty horenia. Problematika triedy reakcie na oheň stavebných výrobkov je po- drobnejšie opísaná vo vedeckej práci [8]. Trie- da reakcie na oheň a rovnako doplnkové klasi- fikácie však žiadnym spôsobom nehodnotia toxicitu produktov horenia. Doteraz nebola publikovaná vedecká práca skúmajúca toxicitu produktov horenia elektrických káblov s triedou reakcie na oheň B2_{ca}, s1, d1, a1. Úda- je o toxicite produktov horenia sú dôležité najmä pre požiarne inžinierstvo (predovšetkým pre výpočet toxicity produktov horenia v priestore a času dostupného na evakuáciu osôb). Táto problematika je podrobne opísaná vo vedeckých prácach [9-12].

Toxicita produktov horenia sa vyjadruje frakčnou efektívnou dávkou (FED). Frakčná efektívna dávka závisí od koncentrácie hlav- ných produktov horenia (predovšetkým oxid uhoľnatý, kyanovodík, zlúčeniny vodíka s ha- logénmi, oxid uhličitý a pokles koncentrácie

in their structure are counted as sum of FED of carbon monoxide (FED_{CO}) and FED of oxygen products of combustion from materials that do not contain nitrogen and halogens concentration decrease (FED_{O_2}). FED_{CO} is calculated according to equation (1) ISO 13571: 2012 [13] and FED_{O_2} is calculated according to equation (2) that is stated e.g. in verification method C/VM2: 2013 with commentary [14].

$$FED_{CO} = \left(\sum_t^{t_0} \frac{[CO]}{35\,000} \Delta t \right) \exp\left(\frac{[CO_2]}{5}\right) \quad (-) \quad (1)$$

$$FED_{O_2} = \sum_t^{t_0} \frac{\Delta t}{(\exp(8.13 - 0.54(20.9 - [O_2])))} \quad (-) \quad (2)$$

FED_{CO} : fractional effective dose of CO (-)

CO: average concentration of CO (ppm)

Δt : time increment (min)

CO_2 : average concentration of CO_2 (vol. %)

FED_{O_2} : fractional effective dose of O_2 (-)

O_2 : average concentration of O_2 (vol. %)

The average concentration of CO_2 in equation (1) is taken into account only if it is higher than 2 vol. %.

$FED = 1$ means that 50% of people exposed to combustion products lose consciousness. Loss of consciousness has a higher predictive value than death; because the person has lost consciousness cannot get out from the danger area alone. Verification Method C/VM2: 2013 [14] requires that persons fleeing the fire have not been exposed FED exceeding 0.3.

An important input to equations (1 and 2) is the concentration of CO, CO_2 and O_2 . Concentrations of CO, CO_2 and O_2 depend not only on the rate of their release from the burning material to the space but also on the volume to which the combustion products dispersed. The volume to which the products of combustion dispersed is determined by the geometry and space ventilation and the heat release rate from the fire. The detailed calculation procedure is, for example, in scientific works [15-16]. In

kyslíka). FED produktov horenia z materiálov, ktoré neobsahujú vo svojej štruktúre dusík a halogény sa počíta ako súčet FED oxidu uhoľnatého (FED_{CO}) a FED poklesu koncentrácie kyslíka (FED_{O_2}). FED_{CO} sa počíta podľa rovnice (1), ktorú uvádza napr. ISO 13571:2012 [13] a FED_{O_2} sa počíta podľa rovnice (2), ktorú uvádza napr. verifikačná metóda C/VM2:2013 s komentárom [14].

FED_{CO} : frakčná efektívna dávka CO (-)

CO: priemerná koncentrácia CO (ppm)

Δt : časový prírastok (min)

CO_2 : priemerná koncentrácia CO_2 (obj. %)

FED_{O_2} : frakčná efektívna dávka O_2 (-)

O_2 : priemerná koncentrácia O_2 (obj. %)

Priemerná koncentrácia CO_2 sa v rovnici (1) zohľadňuje len v prípade, ak je vyššia, ako 2 obj. %.

Hodnota $FED = 1$ znamená, že 50 % osôb exponovaných produktmi horenia stratí vedomie. Strata vedomia má vyššiu výpovednú hodnotu, ako úmrtie, nakoľko osoba ktorá stratila vedomie sa už nedokáže sama dostať z ohrozeného priestoru. Verifikačná metóda C/VM2:2013 [14] vyžaduje, aby osoby unikajúce pred požiarom neboli exponované FED s hodnotou nad 0,3.

Dôležitým vstupným údajom do rovníc (1 a 2) je koncentrácia CO, CO_2 a O_2 . Koncentrácie CO, CO_2 a O_2 nezávisia len od rýchlosti ich uvoľňovania z horiaceho materiálu do priestoru, ale aj od objemu do ktorého sa produkty horenia rozptýlia. Objem do ktorého sa produkty horenia rozptýlia je determinovaný geometriou a odvetraním priestoru a rýchlosťou uvoľňovania tepla z požiaru. Podrobný postup výpočtu je napr. vo vedeckých prácach [15-16]. Z dôvodu zachovania

order to maintain the possibility of applying the data calculated according to equations (1) and (2) for different

spaces with variable ventilation parameters, the FED is often determined for the different volumes to which the combustion products dispersed, for the different ratios of the area or of burning material (product) and the volume to which the products of combustion (emitted from the unit length or area of the burning material) dispersed.

The aim of this paper is to determine the fractional effective dose of combustion products from selected electric cables with reaction to fire class of B2ca, s1, d1, a1, for the ratio of the burning cable length to the volume at which the combustion products are dispersed 1:0.5, 1:1, 1:1.5 and 1:2 m.m⁻³, and to determine the critical ratio at which the fractional effective dose reaches value of 0.3 for 1,800 seconds.

2 Material and methods

The research was subjected to samples of three electric cables with the reaction to fire class of B2ca, s1, d1, a1, manufactured by VUKI, a.s., Slovak Republic. Electrical cables have been marked as CHKE-R 3Jx1.5 (CHKE-R), CHKE-V 3Jx1.5 (CHKE-V) and J-H(St)H 1x2x0.8 (J-H(St)H).

CHKE-R and CHKE-V electrical cables consist of three insulated copper conductors with a cross-section of 1.5 mm², the cable coating and the bedding between the insulated conductors and the cable coating. The insulation of the electrical conductors, the bedding and the cable coating are constituted by an ethylene-based polymer. Also, the insulated electric conductors in the CHKE-V cable are wound with mica tape. The CHKE-R and CHKE-V cable is a power cable designed to power electrical equipment. The CHKE-V cable is resistant to flame spread over the cable harness and maintains its functionality under fire conditions for at least 180 minutes. It is mainly used to power electrical equipment for which functionality is required during a fire. The CHKE-R cable is resistant to flame spread over the cable harness. It is mainly used in areas where non-flame spreading cables are

možnosti aplikácie údajov vypočítaných podľa rovníc (1) a (2) pre rôzne priestory s variabilnými parametrami odvetrania sa FED často stanovuje pre rôzne objemy do ktorých sa produkty horenia rozptýlia, resp. pre rôzne pomery plochy alebo dĺžky horiaceho materiálu (výrobku) a objemu do ktorého sa produkty horenia (uvoľňované z tejto jednotkovej dĺžky alebo plochy horiaceho materiálu) rozptýlené.

Cieľom predloženej vedeckej práce je stanovenie frakčnej efektívnej dávky produktov horenia z vybraných elektrických káblov s triedou reakcie na oheň B2ca, s1, d1, a1, pre pomery dĺžky horiaceho kábla k objemu do ktorého sú produkty horenia rozptýlené 1:0,5, 1:1, 1:1,5 a 1:2 m.m⁻³ a následne stanoviť kritický pomer pri ktorom frakčná efektívna dávka dosiahne hodnotu 0,3 počas 1 800 s.

2 Materiál a metódy

Výskumu boli podrobené vzorky troch elektrických káblov s triedou reakcie na oheň B2ca, s1, d1, a1, vyrobené spoločnosťou VUKI, a.s., Slovenská republika. Elektrické káble boli označené, CHKE-R 3Jx1.5 (CHKE-R), CHKE-V 3Jx1.5 (CHKE-V) a J-H(St)H 1x2x0.8 (J-H(St)H).

Káble CHKE-R a CHKE-V pozostávajú z troch izolovaných medených vodičov s prierezom 1,5 mm², plášťa a výplňového materiálu medzi izolovanými vodičmi a plášťom. Izolácia elektrických vodičov, výplňový materiál aj plášť sú tvorené polymérom na báze etylénu. Izolované elektrické vodiče v kábli CHKE-V sú navyše ovinuté sľudovou páskou. Kábel CHKE-R aj CHKE-V je silnoprávový elektrický kábel na pevné uloženie určený na napájanie elektrických zariadení. Kábel CHKE-V je odolný voči šíreniu plameňa po zväzku elektrických káblov a zachováva svoju funkčnosť v podmienkach požiaru minimálne počas 180 minút. Používa sa najmä na napájanie elektrických zariadení u ktorých sa vyžaduje funkčnosť počas požiaru. Kábel CHKE-R je odolný voči šíreniu plameňa po zväzku káblov. Používa sa hlavne v priestoroch, kde sa vyžadujú elektrické káble nešíriace plameň po povrchu. Nominálne napätie elektrických káblov CHKE-R aj CHKE-V

required. The nominal AC voltage of the CHKE-R and CHKE-V electric cables is 600 V AC. The CHKE-R and CHKE-V electrical cables have an outer diameter of 8 and 9 mm, respectively.

Cable J-H(St)H contains two insulated copper conductors with a cross-section of 0.5 mm², cable coating and bedding between insulated conductors and cable coating. In addition, the insulated electric conductors are wrapped with shielding aluminium foil. The insulation of the electrical conductors, the bedding and the casing are constituted by an ethylene-based polymer. The cable is resistant to flame spread on the surface of the stand-alone cable. J-H(St)H is a control cable to fixed installation. It is mainly used to control technical devices for which there is no requirement for functionality during a fire. The nominal AC power of J-H(St)H is 225 V AC. The J-H(St)H cable diameter is 7.2 mm.

All of the examined cables were free of halogen compounds.

The fractional effective dose of the investigated cables calculated as the sum of FED_{CO} and FED_{O₂}, which were calculated from equations (1) and (2). The input data for the calculation (CO, CO₂ and O₂ concentration) were measured on a cone calorimeter. Both the cone calorimeter and the test procedure complied with the ISO standard 5660-1:2015 [17]. The orientation of the samples during the test was in accordance with ISO 5660-1:2015 [17] horizontal. The samples were subjected to a 50 kW.m⁻².

The combustion product concentrations were calculated from the measured data for the burner cable length ratios to the volume at which the combustion products dispersed 1:0.5, 1:1, 1:1.5 and 1:2 m.m⁻³. These ratios were chosen for the following reasons. At a lower ratio than 1:0.5 m.m⁻³ there would be a very rapid decrease in oxygen concentration and no flame burning, but thermal decomposition with very limited air access (for the simulation of these conditions is not a cone calorimeter according to ISO 5660-1:2015 [17] designed). Conversely, at a ratio greater than 1:2 m.m⁻³, the cables examined have not reached the critical value of the FED even after complete burning. The critical ratio of the length of

je 600 V AC. Priemer elektrických káblov CHKE-R a CHKE-V bol 8 a 9 mm.

Kábel J-H(St)H pozostáva z dvoch izolovaných medených vodičov s prierezom 0,5 mm², plášťa a výplňového materiálu medzi izolovanými vodičmi a plášťom. Izolované elektrické vodiče sú navyše ovinuté tieniacou hliníkovou fóliou. Izolácia elektrických vodičov, výplňový materiál aj plášť sú tvorené polymérom na báze etylénu. Kábel je odolný voči šíreniu plameňa po povrchu samostatne stojaceho kábla. J-H(St)H je ovládací kábel na pevné uloženie. Používa sa najmä na ovládanie technických zariadení, na ktoré nie sú kladené požiadavky na funkčnosť počas požiaru. Nominálne striedavé napätie elektrického kábla J-H(St)H je 225 V AC. Priemer elektrického kábla J-H(St)H je 7,2 mm.

Všetky skúmané káble boli bez obsahu halogénových prvkov.

Frakčná efektívna dávka skúmaných káblov bola vypočítaná akú súčet FED_{CO} a FED_{O₂}, ktoré boli vypočítané z rovníc (1) a (2). Vstupné údaje pre výpočet (koncentrácie CO, CO₂ a O₂) boli zmerané na kónickom kalorimetri. Kónický kalorimeter aj skúšobný postup boli v súlade s technickou normou ISO 5660-1:2015 [17]. Orientácia vzoriek počas skúšky bola v súlade s ISO 5660-1:2015 [17] horizontálna. Vzorky boli počas skúšky zaťažené tepleným tokom z kónického žiariča 50 kW.m⁻².

Koncentrácie produktov horenia boli zo zmeraných údajov vypočítané pre pomery dĺžok horiaceho kábla k objemu do ktorého sa produkty horenia rozptýlili 1:0,5, 1:1, 1:1,5 a 1:2 m.m⁻³. Uvedené pomery boli zvolené z nasledovných dôvodov. Pri menšom pomere, ako 1:0,5 m.m⁻³ by došlo k veľmi rýchlemu poklesu koncentrácie kyslíka a ďalej by neprebíhalo plameňové horenie, ale termický rozklad s veľmi obmedzeným prístupom vzduchu (na simuláciu týchto podmienok nie je kónický kalorimeter podľa ISO 5660-1:2015 [17] určený). Naopak, pri pomere väčšom, ako 1:2 m.m⁻³ už skúmané káble nedosiahli kritickú hodnotu FED ani po úplnom zhorení vzorky. Kritický pomer dĺžky horiaceho kábla k objemu do ktorého sú produkty horenia rozptýlené bol stanovený ako pomer, pri ktorom FED nedosiahla kritickú hodnotu ani po 1 800 s.

the burning cable to the volume to which the combustion products are dispersed was determined as the ratio at which the FED did not reach critical value even after 1,800 seconds.

3 Results and discussion

Concentrations of the main combustion products (CO, CO₂ and O₂) at the ratio of the length of the burning cable to the volume into which the products of combustion have dispersed 1:1 m.m⁻³ are shown in Tab. 1.

From data in the Tab. 1 fractional effective doses were calculated (FED), for the ratio of the length of the burning cable to the volume to which the combustion products are dispersed 1:0.5, 1:1, 1:1.5 and 1:2 m.m⁻³. The time dependence of calculated fractional effective doses for the cable CHKE-R is shown in the Fig. 1, for the cable CHKE-V is shown in the Fig. 2 and for the cable J-H(St)H is shown in the Fig. 3.

The Figs. 1 to 3 show that at the ratio of the length of the burning cable to the volume at which the combustion products are dispersed more than 1:2 m.m⁻³ the fractional effective dose value does not exceed the value 0.3 throughout the duration of the test (1 800 seconds), or even after a complete deterioration of the sample. The stated FED value considers the verification method C/VM2:2013 [14] to be critical. Therefore, the ratio of the length of the investigated electrical cables to the volume at which the combustion products are dispersed at 1:2 m.m⁻³ is considered to be critical in terms of endangering the lives and health of the persons by the combustion products.

The CHKE-R electric cable did not reach a critical value of FED = 0.3 nor for the ratio between the length of burning cable to the volume at which the combustion products dispersed 1:1.5 m.m⁻³ (throughout the test). This fact proves that this cable showed the lowest toxicity of the combustion products from the investigated electric cables.

Figs. 1 to 3 show the statistical dependencies of the FED on time together with the coefficient of determinations (R^2). The obtained statistical dependence proves that the FED of

3 Výsledky a diskusia

Koncentrácie hlavných zložiek produktov horenia (CO, CO₂ a O₂) pri pomere dĺžky horiaceho kábla k objemu do ktorého sa produkty horenia rozptýlili 1:1 m.m⁻³ sú znázornené v Tab. 1.

Z údajov v Tab. 1 boli vypočítané frakčné efektívne dávky (FED), pre pomery dĺžky horiaceho kábla k objemu do ktorého sú produkty horenia rozptýlené 1:0,5, 1:1, 1:1,5 a 1:2 m.m⁻³. Časová závislosť vypočítaných frakčných efektívnych dávok pre kábel CHKE-R ja na obr. 1, pre kábel CHKE-V na obr. 2 a pre kábel J-H(St)H na obr. 3.

Obr. 1 až 3 dokazujú, že pri pomere dĺžky horiaceho kábla k objemu do ktorého sa produkty horenia rozptýlia väčšom ako 1:2 m.m⁻³ hodnota frakčnej efektívnej dávky nepresiahne hodnotu 0,3 počas celého času trvania skúšky (1 800 s), resp., ani po úplnom zhorení vzorky. Uvedenú hodnotu FED považuje verifikačná metóda C/VM2:2013 [14] za kritickú. Preto môže byť pomer dĺžky skúmaných elektrických káblov k objemu do ktorého sa produkty horenia rozptýlia 1:2 m.m⁻³ považovaný za kritický z hľadiska ohrozenia životov a zdravia osôb produktmi horenia.

Elektrický kábel CHKE-R nedosiahol kritickú hodnotu FED = 0,3 ani pri vzájomnom pomere dĺžky horiaceho kábla a objemu do ktorého sa produkty horenia rozptýlili 1:1,5 m.m⁻³ (počas celého času trvania skúšky). Táto skutočnosť dokazuje, že zo skúmaných elektrických káblov vykázal tento kábel najnižšiu toxicitu produktov horenia.

Na obr. 1 až 3 sú znázornené štatistické závislosti FED od času spolu s príslušnými koeficientmi determinácie (R^2). Získané štatistické závislosti dokazujú, že FED produktov horenia skúmaných káblov závisí od času mocnínovo. Koeficienty determinácie (R^2) sú vo všetkých prípadoch rovné alebo väčšie, ako 0,97. Získané mocninové štatistické závislosti sú teda veľmi silné.

Získané mocninové závislosti nájdú aplikáciu najmä pri výpočte času, kedy za konkrétnych podmienok (dĺžka horiacich káblov a objem do ktorého sa produkty horenia rozptýlia) bude dosiahnutá kritická hodnota frakč-

the combustion products of the investigated cables depends on time by exponentiation dependency. The determination coefficients (R^2) are in all cases equal to or greater than 0.97. The acquired exponentiation dependencies are therefore very strong.

The acquired exponentiation dependencies finds application, especially when calculating

the time when under a specific condition (the length of the burning cables and the volume into which the combustion products dispersed), a critical fractional effective dose of 0.3 will be achieved. This time is an important input for calculating the available safe escape time. When calculating available safe escape time, however, in addition to the fractional effective dose of combustion products, a decrease in visibility in the area affected by combustion products has to be taken into account (this issue is described in detail in scientific papers [18-19]) and the temperature increase in the space [20-21]). The calculation of safe escape time is described in scientific papers [9-12].

Direct comparison of the data obtained with the results of other scientific work is complicated. The reason is the fact that in the prescriptive way of solving the fire safety of structures the only requirement (from the point of fire protection) for the electric cable is the reaction to fire class (and eventual functionality during a fire). As today most of the fire safety of structures projects have been designed in a prescriptive way, scientific studies to investigate the toxicity of burning products of electric cables with a reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1 have not yet been published. However, to address the fire safety of complex and atypical structures and a large proportion of engineering structures that have to be dealt with on the basis of fire engineering principles, these data are missing. Comparison is therefore only possible with scientific papers examining the toxicity of polymers used to produce components of halogen-free electrical cables (insulation, bedding and cable coating) or the toxicity of electrical cable combustion products with properties similar to those of the investigated electrical cables. The polymer toxicity issues that are used to produce components of halogen-free electrical cables and electrical cables with properties similar to the investigated

nej efektívnej dávky 0,3. Uvedený čas je dôležitým vstupným údajom pre výpočet bezpečného únikového času. Pri výpočte bezpečného únikového času je však okrem frakčnej efektívnej dávky produktov horenia potrebné zohľadniť aj pokles viditeľnosti v priestore zasiahnutom produktmi horenia (táto problematika je podrobne popísaná vo vedeckých prácach [18-19]) a nárast teploty v priestore (postup podrobne riešia vedecké práce [20-21]). Výpočet bezpečného únikového času je popísaný vo vedeckých prácach [9-12].

Priame porovnanie získaných údajov s výsledkami iných vedeckých prác je komplikované. Dôvodom je skutočnosť, že pri preskriptívnom spôsobe riešenia požiarnej bezpečnosti stavieb je jedinou požiadavkou (z hľadiska požiarnej ochrany) na elektrický kábel trieda reakcie na oheň (a prípadne funkčnosť počas požiaru). Nakoľko sa dnes väčšina stavieb z hľadiska požiarnej bezpečnosti projektuje preskriptívnym spôsobom neboli zatiaľ publikované vedecké práce skúmajúce toxicitu produktov horenia elektrických káblov s triedou reakcie na oheň B2_{ca}, s1, d1, a1. Pri riešení požiarnej bezpečnosti komplexných a atypických stavieb a veľkej časti inžinierskych stavieb, ktoré sa musia riešiť na základe princípov požiarneho inžinierstva však tieto údaje chýbajú. Porovnanie je preto možné len s vedeckými prácami, ktoré skúmali toxicitu polymérov používaných na výrobu komponentov bezhalogénových elektrických káblov (izolácia, výplň a plášť) alebo toxicitu produktov horenia elektrických káblov s podobnými vlastnosťami, ako majú skúmané elektrické káble. Problematiku toxicity polymérov, ktoré sa používajú na výrobu komponentov bezhalogénových elektrických káblov a elektrických káblov s vlastnosťami podobnými k skúmaným elektrickým káblom skúmali vedecké práce [22-25]. Porovnanie údajov získaných v predloženej vedeckej práci s výsledkami vedeckých prác [22-25] dokazuje, že toxicita produktov horenia zo skúmaných elektrických káblov leží v intervale toxicity produktov horenia polymérov používaných na výrobu komponentov bezhalogénových elektrických káblov a elektrických káblov s podobnými vlastnosťami ako mali skúmané káble.

electrical cables have been studied by scientific works [22-25]. Comparison of the data obtained in the present scientific work with the results of the scientific work [22-25] demonstrates that the toxicity of the combustion products from the investigated electric cables lies within the range of polymer burning toxicity of the polymers used for the manufacture of components of halogen-free electric cables and electric cables with properties like those examined.

The toxicity of electrical cable combustion products [26] also affects the interference of electrical cables. However, as long as the technical standard ISO 5660-1:2015 [17] requires the positioning of samples closely next to each other, only the toxicity of fire products burned during test (cone calorimeter tests) placed next to each other has been investigated in this scientific work. Further research will focus on assessing the effect of the interconnection of electric cables on the toxicity of combustion products.

Na toxicitu produktov horenia elektrických káblov má podľa [26] vplyv aj vzájomný rozstup elektrických káblov. Nakoľko však technická norma ISO 5660-1:2015 [17] vyžaduje pri skúške uloženie vzoriek tesne vedľa seba bola v tejto vedeckej práci skúmané len toxicita produktov horenia elektrických káblov uložených počas požiaru (skúšky na kónickom kalorimetri) tesne vedľa seba. Ďalší výskum bude zameraný na posúdenie vplyv vzájomného rozstupu elektrických káblov na toxicitu produktov horenia.

Tab. 1 Concentrations of CO, CO₂ and O₂ in combustion products from investigated electric cables dispersed in 1 m³.

Tab. 1 Koncentrácie CO, CO₂ a O₂ v produktoch horenia zo skúmaných elektrických káblov rozptýlených v 1 m³.

Time / Čas (s)	Electrical cable / Elektrický kábel (-)								
	CHKE-R			CHKE-V			J-H(St)H		
	CO (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
0	0	0	20.95	0	0	20.95	0	0	20.95
300	62	0.56	20.02	88	0.69	19.80	74	0.50	20.09
600	158	1.19	18.97	159	1.25	18.87	207	1.03	19.19
900	355	1.97	17.62	311	1.89	17.76	845	1.73	18.01
1200	592	2.52	16.72	583	2.76	16.27	897	1.83	17.86
1500	888	2.62	16.56	1054	3.02	15.85	982	1.85	17.84
1800	920	2.63	16.55	1310	3.10	15.71	1014	1.85	17.83

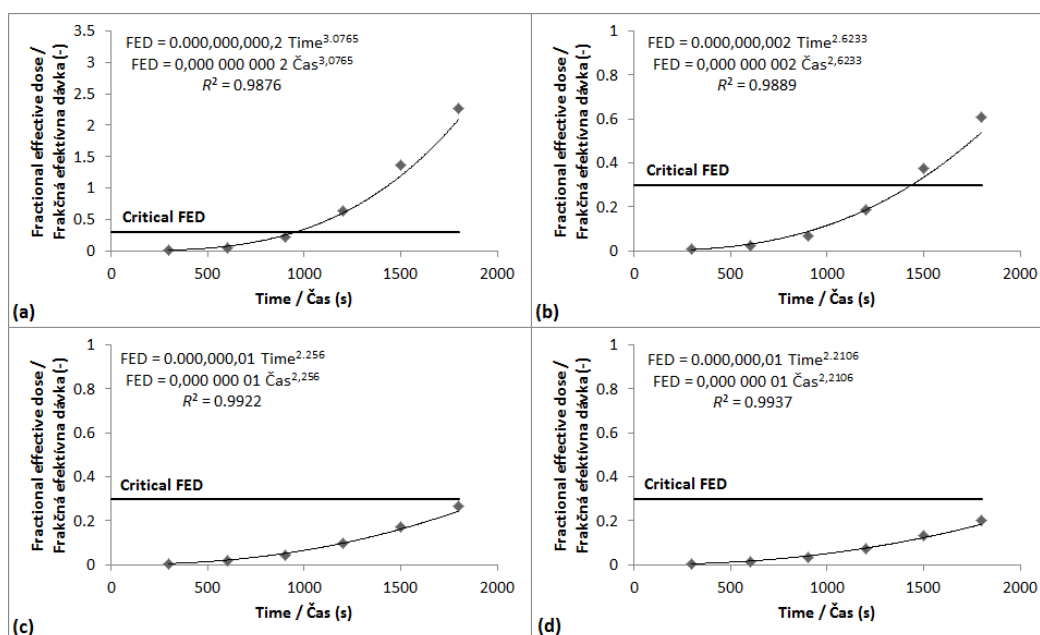


Fig 1. Fractional effective dose of combustion products from the CHKE-R electrical cable at the ratio of burning cable length to the volume at which the combustion products disperse: (a) 1:0.5 m.m⁻³; (b) 1:1 m.m⁻³; (c) 1:1.5 m.m⁻³; (d) 1:2 m.m⁻³.

Obr. 1 Frakčná efektívna dáva produktov horenia z elektrického kábla CHKE-R pri pomere dĺžky horiaceho kábla k objemu do ktorého sa produkty horenia rozptýlia: (a) 1:0,5 m.m⁻³; (b) 1:1 m.m⁻³; (c) 1:1,5 m.m⁻³; (d) 1:2 m.m⁻³.

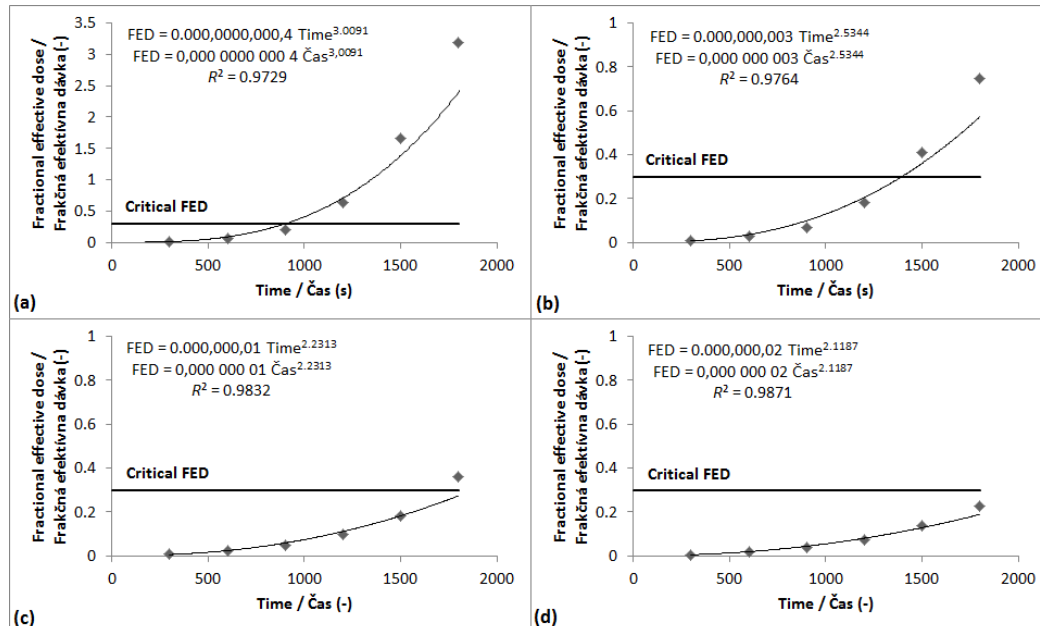


Fig 2. Fractional effective dose of combustion products from the CHKE-V electrical cable at the ratio of burning cable length to the volume at which the combustion products disperse: (a) 1:0.5 m.m⁻³; (b) 1:1 m.m⁻³; (c) 1:1.5 m.m⁻³; (d) 1:2 m.m⁻³.

Obr. 2 Frakčná efektívna dáva produktov horenia z elektrického kábla CHKE-V pri pomere dĺžky horiaceho kábla k objemu do ktorého sa produkty horenia rozptýlia: (a) 1:0,5 m.m⁻³; (b) 1:1 m.m⁻³; (c) 1:1,5 m.m⁻³; (d) 1:2 m.m⁻³.

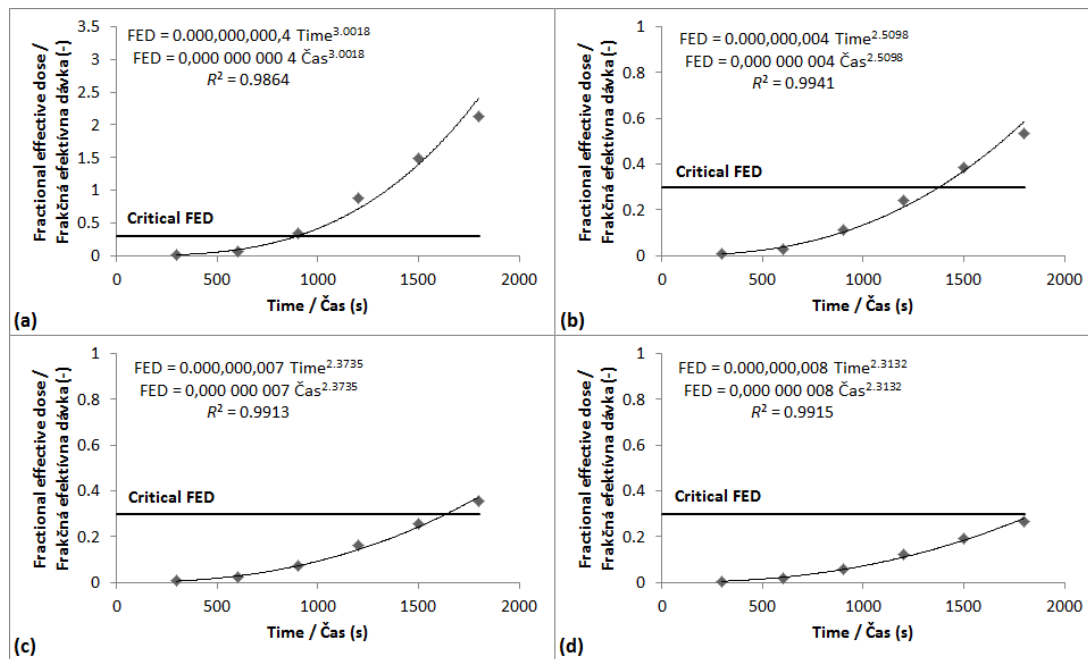


Fig 3. Fractional effective dose of combustion products from the J-H (St) H electric cable at the ratio of burning cable length to the volume at which the combustion products disperse: (a) 1:0.5 m.m⁻³; (b) 1:1 m.m⁻³; (c) 1:1.5 m.m⁻³; (d) 1:2 m.m⁻³.

Obr. 3 Frakčná efektívna dáva produktov horenia z elektrického kábla J-H(St)H pri pomere dĺžky horiaceho kábla k objemu do ktorého sa produkty horenia rozptýlia: (a) 1:0,5 m.m⁻³; (b) 1:1 m.m⁻³; (c) 1:1,5 m.m⁻³; (d) 1:2 m.m⁻³

4 Conclusion

Toxicity of combustion products is the most serious accompanying phenomenon of fire in terms of the total number of fire victims. The combustion product toxicity is determined by the amount of released main components of the combustion products (in particular CO and CO₂), the amount of oxygen consumed (O₂), the volume to which the combustion products disperse and the exposure time (persons). Toxicity of electrical cable combustion products can be quantified based on the critical ratio of the length of the burning cable to the volume at which the combustion products are dispersed, at which the critical fractional effective dose rate of 0.3 is not yet reached, at 1,800 seconds of fire.

Comparison of three different electrical cables (no flame spreading power cord, maintaining functionality under fire conditions for 180 minutes, no flame spreading power cord and no flame spreading control cable standing-

4 Záver

Toxicita produktov horenia je z hľadiska celkového počtu obetí požiarov najzávažnejší sprievodný jav požiaru. Toxicita produktov horenia je determinovaná množstvom uvoľnených hlavných zložiek produktov horenia (predovšetkým CO a CO₂), množstvom spotrebovaného kyslíka (O₂), objemom do ktorého sa produkty horenia rozptýlia a časom expozície (osôb). Toxicita produktov horenia elektrických káblov môže byť kvantifikovaná na základe kritického pomeru dĺžky horiaceho kábla k objemu do ktorého sú produkty horenia rozptýlené, pri ktorom ešte nie je dosiahnutá kritická hodnota frakčnej efektívnej dávky 0,3, počas 1 800 s požiaru (horenia).

Porovnanie troch rôznych elektrických káblov (napájací kábel nešíriaci plameň po povrchu so zachovaním funkčnosti za podmienok požiaru počas 180 min, napájací kábel nešíriaci plameň po povrchu a ovládací kábel nešíriaci plameň po povrchu samostatne

alone cable) with a reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1 proves that electric cables with a reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1 show a very similar toxicity of the combustion products (the critical ratio of the length of the burning cable to the volume at which the combustion products dispersed in the range from 1:1.5 to 1:2 m.m⁻³).

To reduce the risk of toxicity of combustion products of electrical cable with a reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1, a1 (free of halogen elements) to an acceptable level it is therefore necessary to ensure that the combustion products released from the burning of cable 1 m dispersed in a minimum volume of 2 m³ (this can be achieved, for example, appropriate dimensioning of fire ventilation). This conclusion on reduction the risk to an acceptable level applies to the toxicity of combustion products of halogen-free electric cables with a reaction to fire class of B2_{ca}, s1, d1 and a1 (with a diameter of up to 10 mm) may not apply to thermal load and visibility in the area affected by the combustion products.

Acknowledgement

This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under the contract No. APVV-16-0223

References / Literatúra

- [1] Masarik I, Dvorak O, Charvatova V. 1999. Investigation of Combustion Products Toxicity. Technical Institute of Fire Safety of the Ministry of Interior of the Czech Republic.
- [2] Dvorak O, Charvatova V, Ruzicka M. 2007. Danger of Combustion Products of Materials. Ministry of Interior of the Czech Republic.
- [3] Gann RG, Bryner NP. 2008. Combustion products and their effects on life safety. Pages 749-772 in Cote AE, ed. Fire Protection Handbook. 20th ed. National Fire Protection Association.
- [4] Purser DA. 2016. Toxicity assessment of combustion products. Pages 300-388 in DiNenno PJ, ed. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. Society of Fire Protection Engineers.
- [5] STN 92 0203:2013. Fire Protection of Buildings. Continuous Power Supply Responding for Fire. Office for Standardization, Metrology and Testing of the Slovak Republic.
- [6] TP 13/2015. Technical Requirements: fire safety of road tunnels. Ministry of Transport, Construction and Regional Development of the Slovak Republic.
- [7] Bayka 2018. Cables According to CPR. Bayerische Kabelwerke AG (15 March 2018; http://www.bayerische-kabelwerke.de/Produkte/BauPVO/Technische_Informationen_Bau_PVO/?lang=en&).
- [8] Mitterova I, Zachar M, Ruzinska E, Majlingova A. 2014. Ignitability of Unprotected and Retardant Protected Samples of Spruce Wood. Advanced Materials Research 1001:330-335.

stojaceho kábla) s triedou reakcie na oheň B2_{ca}, s1, d1, a1 dokazuje, že elektrické káble s triedou reakcie na oheň B2_{ca}, s1, d1, a1 vykazujú veľmi podobnú toxicitu produktov horenia (kritický pomer dĺžky horiaceho kábla k objemu do ktorého sú produkty horenia rozptýlené v intervale od 1:1,5 do 1:2 m.m⁻³).

Pre zníženie rizika toxicity produktov horenia elektrických káblov triedy reakcie na oheň B2_{ca}, s1, d1, a1 (bez obsahu halogénových prvkov) na akceptovateľnú úroveň je preto nutné zabezpečiť, aby sa produkty horenia uvoľnené z 1 m horiaceho kábla rozptýlili do objemu minimálne 2 m³ (toto môže byť dosiahnuté napr. vhodným dimenzovaním požiarného odvetrania). Uvedený záver o znížení rizika na akceptovateľnú úroveň platí pre toxicitu produktov horenia bezhalogénových elektrických káblov triedy reakcie na oheň B2_{ca}, s1, d1 a1 (s priemerom do 10 mm), nemusí platiť pre tepelné zaťaženie a viditeľnosť v priestore zasiahnutom produktmi horenia.

PodĎakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-16-0223.

- [9] Kucera P, Kaiser R, Pavlik T, Pokorny J. 2009. Fire Engineering: fire dynamics. SPBI.
- [10] Tang F, He Q, Shi Q. 2017. Experimental study on thermal smoke layer thickness with various upstream blockage–fire distances in a longitudinal ventilated tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 170:141-148.
- [11] Mozer V. 2014. An analysis of factors affecting available safe escape time. *Advanced Materials Research* 1001:267-271.
- [12] Boyce K. 2017. Safe Evacuation for All - Fact or Fantasy? Past Experiences, Current Understanding and Future Challenges. *Fire Safety Journal* 91:28-40.
- [13] ISO 13571:2012. Life Threatening Components of Fire: Guidelines for the Estimation of Time to Compromised Tenability in Fires. International Organisation for Standardisation.
- [14] C/VM2:2013. Verification Method: Framework for Fire Safety Design with Commentary. Ministry of Business, Innovation and Employment of the New Zealand.
- [15] Giachetti B, Couton D, Plourde F. 2016. Smoke Spreading Analysis from an Experimental Subway Scale Model. *Fire Safety Journal* 86:75-82.
- [16] Lai C, Chen CJ, Tsai MJ, Tsai MH, Lin TH. 2013. Determinations of the Fire Smoke Layer Height in a Naturally Ventilated Room. *Fire Safety Journal* 58:1-14.
- [17] ISO 5660-1:2015 Reaction to Fire Tests: Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate — Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method) and Smoke Production Rate (Dynamic Measurement). International Organisation for Standardisation.
- [18] Collins BL, Dahir MS, Madrzykowski D. 1993. Visibility of Exit Signs in Clear and Smoky Conditions. *Fire Technology* 29:154-182.
- [19] Starr JW, Lattimer BY. 2014. Evaluation of Navigation Sensors in Fire Smoke Environments. *Fire Technology* 50:1459-1481.
- [20] Li D, Zhu G, Zhu H, Yu Z, Gao Y, Jiang X. 2017. Flame Spread and Smoke Temperature of Full-scale Fire Test of Car Fire. *Case Studies in Thermal Engineering* 10:315-324.
- [21] Walton WD, Thomas PH, Ohmiya Y. 2016. Estimating Temperatures in Compartment Fires. Pages 996-1042 in DiNenno PJ, ed. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5th ed. Society of Fire Protection Engineers.
- [22] Tewarson A. 2002. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. Pages 618-697 in DiNenno PJ, ed. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed. Society of Fire Protection Engineers.
- [23] Hull TR, Quinn RE, Areri IG, Purser DA. 2002. Combustion Toxicity of Fire Retarded EVA. *Polymer Degradation and Stability* 77:235-242.
- [24] Hull TR, Lebek K, Pezzani M, Messa S. 2008. Comparison of Toxic Product Yields of Burning Cables in Bench and Large-scale Experiments. *Fire Safety Journal* 43:140-150.
- [25] Luche J, Mathis E, Rogaume T, Richard F, Guillaume E. 2012. High-density Polyethylene Thermal Degradation and Gaseous Compound Evolution in a Cone Calorimeter. *Fire Safety Journal* 54:24-35.
- [26] Meinier R, Sonnier R, Zavaleta P, Suard S, Ferry L. 2018. Fire Behavior of Halogen-free Flame Retardant Electrical Cables with the Cone Calorimeter. *Journal of Hazardous Materials* 342:306-316.