

Technická univerzita vo Zvolene



Karol Balog, Danica Kačíková, Jozef Martinka

ZISŤOVANIE PRÍČIN VZNIKU POŽIAROV

Vysokoškolská učebnica

2015

Autori:

prof. Ing. Karol Balog, PhD. – Úvod, 2.4, 3, 4, 11, 12, Záver.

Slovenská technická univerzita v Bratislave

Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Paulínska 16, 917 24 Trnava

prof. RNDr. Danica Kačíková, PhD. – Úvod, 7, 9, Záver.

Technická univerzita vo Zvolene, Drevárska fakulta, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen

Ing. Jozef Martinka, PhD. – 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9.1.1, 9.2, 10, 11, 12.

Slovenská technická univerzita v Bratislave

Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Paulínska 16, 917 24 Trnava

ZISŤOVANIE PRÍČIN VZNIKU POŽIAROV

Vysokoškolská učebnica

Recenzenti:

prof. Ing. Anton Osvald, CSc. – ŽU v Žiline, FBI

prof. Ing. Maroš Soldán, PhD. – STU v Bratislave, MTF

doc. Ing. Petr Kučera, PhD. – VŠB TU Ostrava, FBI

1. vydanie, 20,80 AH, 21,33 VH

Náklad 250 výtlačkov

Vydavateľ: Technická univerzita vo Zvolene

Rok vydania: 2015

Grafická úprava a tlač: Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene

www.tuzvo.sk

© Technická univerzita vo Zvolene

© prof. Ing. Karol Balog, PhD.

prof. RNDr. Danica Kačíková, PhD.

Ing. Jozef Martinka, PhD.

Za odbornú úroveň tohto vysokoškolského učebného textu zodpovedajú autori a recenzenti.

Rukopis neprešiel jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-228-2831-4

Všetky práva vyhradené. Žiadna časť textu ani ilustrácie nemôžu byť použité na ďalšie šírenie akokoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autorov alebo vydavateľa.



Táto publikácia je vytlačená na 100 % PEFC certifikovanom papieri.

Obsah

Predhovor	7
Úvod	9
1. Právne aspekty zisťovania príčin vzniku požiarov	11
1.1. Vyšetrovanie požiarov	11
1.2. Zisťovanie príčin vzniku požiarov.....	14
1.3. Terminológia v oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov v NFPA 921:2014	17
2. Iniciácia požiaru a iniciálne zdroje	19
2.1. Prenos tepla	22
2.1.1. Prenos tepla vedením	22
2.1.2. Prenos tepla prúdením.....	29
2.1.3. Prenos tepla žiarením a žiarenie plameňa	32
2.1.3.1 Teoretická teplota plameňa	36
2.1.3.2 Žiarenie plameňa	38
2.2. Mechanizmus iniciácie a horenia horľavých látok	42
2.3. Iniciačné zdroje.....	47
2.3.1. Plameň.....	47
2.3.2. Horúci povrch.....	48
2.3.3. Tepelné prejavy elektrického prúdu	49
2.3.3.1 Elektrický skrat	58
2.3.3.2 Zvýšený prechodový odpor a preťaženie.....	65
2.3.3.3 Elektrický oblúk a elektrická iskra	66
2.3.3.4 Statická elektrina.....	69
2.3.3.5 Nesprávna inštalácia elektrického zariadenia alebo zhoršenie možnosti odvodu tepla	70
2.3.4. Tepelné prejavy mechanickej energie.....	74
2.3.5. Exotermické chemické reakcie	74
2.4. Samovznietenie	75
2.4.1. Fyzikálno-chemické samovznietenie	76
2.4.2. Chemické samovznietenie.....	77
2.4.3. Biologické samovznietenie	82
2.4.4. Samovznietenie uhlia.....	84
2.4.4.1 Vplyv času na reaktivitu uhlia s kyslíkom.....	86
2.4.4.2 Vplyv teploty na reaktivitu uhlia s kyslíkom	87
2.4.4.3 Vplyv koncentrácie na reaktivitu uhlia s kyslíkom	87
2.4.4.4 Vplyv frakčného žiarenia na reaktivitu uhlia s kyslíkom.....	88
2.4.4.5 Vplyv vlhkosti a kontaktu s vodou na reaktivitu uhlia s kyslíkom.....	89
2.4.4.6 Vplyv stupňa zuhoľnatenia na reaktivitu uhlia s kyslíkom.....	91
3. Horľavé látky	93
3.1. Horľavé plyny.....	96
3.2. Horľavé kvapaliny.....	102

3.3. Horľavé tuhé látky.....	107
3.3.1. Organické polyméry	108
3.3.1.1 Výroba syntetických polymérov.....	109
3.3.1.2 Vlastnosti syntetických polymérov	110
3.3.1.3 Termická degradácia syntetických polymérov	114
3.3.1.4 Odhad termickej stability syntetických polymérov	115
3.3.1.5 Drevo	117
4. Oxidačné prostriedky	121
5. Chémia horenia	125
6. Dynamika rozvoja vnútorného požiaru.....	133
6.1. Rýchlosť uvoľňovania tepla z rozvíjajúceho sa požiaru	134
6.2. Vzostupný prúd horúcich plynov a prúdenie pod stropom	136
6.3. Kritická rýchlosť uvoľňovania tepla pre etapu flashover.....	143
6.4. Priemerná teplota plynov v požiarom úseku.....	144
7. Riadenie dymu	147
7.1. Charakteristiky dymu pri vnútorných a vonkajších požiaroch	147
7.1.1. Vznik, pohyb, teplota, hustota a množstvo vzniknutého dymu.....	147
7.1.2. Vplyv chémie paliva, fyzikálnych vlastností a množstva oxidačného prostriedku na chemické a fyzikálne charakteristiky dymu	148
7.1.3. Zmena vlastností dymu	149
7.1.4. Pohyb dymu – prúdenie plynov pri požiaru.....	150
7.1.5. Zóny zadymenia pri vnútorných požiaroch.....	150
7.2. Riadenie dymu pri vnútorných požiaroch.....	153
7.2.1. Pohyb dymu a kontrola dymu v budovách	153
7.2.2. Riadenie dymu vo veľkých priestoroch.....	156
7.3. Dymový manažment vonkajších požiarov	158
7.3.1. Charakteristika vybraných vonkajších požiarov.....	158
7.3.2. Zloženie a pohyb dymu pri vonkajších požiaroch	159
7.3.3. Kvalitatívne parametre ovzdušia.....	160
7.3.4. Úlohy dymového manažmentu riadených vonkajších požiarov.....	161
7.3.5. Metódy riadenia dymu pri plánovaných požiaroch	162
7.3.5.1 Zmenšenie množstva dymu pri vonkajších požiaroch.....	162
7.3.5.2 Prerozdelenie emisií.....	163
8. Stopy po požiaru a odber vzoriek	165
8.1. Kriminalistický popis stôp.....	165
8.2. Stopy po požiaru	168
8.2.1. Stopy indikujúce miesto a čas vzniku požiaru.....	169
8.2.2. Stopy indikujúce smer šírenia požiaru	181
8.2.3. Stopy indikujúce intenzitu požiaru	186
8.2.4. Stopy indikujúce zanedbanie povinností na úseku ochrany pred požiaru.....	188
8.2.5. Stopy indikujúce úmyselné spôsobenie požiaru.....	189

8.3. Vyhľadávanie zvyškov horľavých kvapalín na mieste požiaru.....	191
8.3.1. Elektronické detektory	192
8.3.2. Kolorimetrické trubice	193
8.3.3. Psy na detekciu zvyškov horľavých kvapalín	193
8.3.4. Absorbenty horľavých kvapalín	194
8.3.5. Detekcia pod ultrafialovým svetlom.....	194
8.3.6. Prenosný chromatograf s hmotnostným spektrometrom	194
8.4. Odber vzoriek.....	195
9. Laboratórna analýza vzoriek.....	197
9.1. Analýza zvyškov horľavých kvapalín.....	197
9.1.1. Extrakcia zvyškov horľavých kvapalín.....	197
9.1.2. Chromatografia.....	200
9.1.2.1. Princípy chromatografického procesu.....	202
9.1.2.2. Separčné mechanizmy	205
9.1.2.3. Plynová chromatografia	209
9.1.2.4. Kvapalinová chromatografia.....	211
9.1.2.5. Aplikácie chromatografických metód	212
9.1.2.6. Využitie chromatografie na stanovenie zvyškov po horľavých kvapalinách	213
9.2. Analýza elektrických vodičov.....	217
10. Požiarnotechnické vlastnosti látok a ich využitie v procese zisťovania príčin vzniku požiarov	221
10.1. Iniciačné charakteristiky	222
10.2. Medze výbušnosti horľavých plynov, pár a prachov	227
10.3. Trieda reakcie na oheň stavebných výrobkov	229
10.4. Rýchlosť uvoľňovania sprievodných javov požiaru.....	231
10.5. Sklon tuhej látky k propagácii požiaru vo fáze flashover	234
10.6. Požiarnotechnické charakteristiky pre špeciálne použitie.....	236
11. Stanovenie príčiny vzniku požiaru	239
11.1. Zásady postupu pri zisťovaní príčin vzniku požiarov v zmysle pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002	239
11.2. Postup zisťovania príčin vzniku požiarov v zmysle NFPA 921:2014	240
11.2.1. Zisťovanie príčin vzniku požiarov automobilov	244
11.2.2. Zisťovanie príčin vzniku lesných požiarov.....	246
12. Štatistika požiarovosti	253
Záver	257
Zoznam bibliografických odkazov	259
Prílohy	271

Predhovor

Vážení čitatelia, do rúk sa Vám dostáva vysokoškolská učebnica s názvom „Zisťovanie príčin vzniku požiarov“. Podnetom pre jej napísanie a vydanie bol dlhodobý nedostatok edukačnej a odbornej literatúry v predmetnej problematike v slovenskom jazyku. Problematika zisťovania príčin vzniku požiarov patrí medzi najzložitejšie a najkomplexnejšie v oblasti ochrany pred požiarimi. Táto problematika sa svojím rozsahom čiastočne prelína so súdnym inžinierstvom, kriminalistikou a trestným právom. Okrem toho zisťovanie príčin vzniku požiarov vychádza z dynamiky rozvoja požiaru, chémie (predovšetkým chémie horenia a analytickej chémie), fyziky (predovšetkým prenosu tepla), elektrotechniky, strojárskoho inžinierstva, matematiky a ďalších vedných odborov. Následkom uvedeného širokého zamerania neexistuje v Slovenskej republike jedno pracovisko, ktoré by dokázalo samostatne, bez poznatkov iných pracovísk, riešiť komplexne a vyčerpávajúcym spôsobom zisťovanie príčin vzniku požiarov. Z uvedeného dôvodu sa na vytvorení predkladanej publikácie podieľal kolektív autorov zo Slovenskej technickej univerzity v Bratislave a Technickej univerzity vo Zvolene, ktorého členovia sa dlhodobo a systematicky venujú problematike zisťovania príčin vzniku požiarov a oblastiam s ním priamo súvisiacimi.

Predkladaná vysokoškolská učebnica je určená predovšetkým poslucháčom univerzít všetkých troch stupňov v študijných programoch:

- Protipožiarna ochrana a bezpečnosť v študijnom odbore 8.3.6 Záchranné služby na Drevárskej fakulte Technickej univerzity vo Zvolene,
- Integrovaná bezpečnosť v študijnom odbore 8.3.5 Bezpečnosť a ochrana zdravia pri práci na Materiálovotechnologickej fakulte Slovenskej technickej univerzity v Bratislave,
- Záchranné služby v študijnom odbore 8.3.6 Záchranné služby na Fakulte bezpečnostného inžinierstva Žilinskej univerzity v Žilne.

Kópie listov odporúčajúcich predkladanú publikáciu ako vysokoškolskú učebnicu pre citované študijné programy na uvedených univerzitách, od príslušných garantov, sú uvedené v prílohe A tejto vysokoškolskej učebnice.

Okrem poslucháčov univerzít prinesie predkladaná publikácia cenné údaje aj pre osoby zaoberajúce sa zisťovaním príčin vzniku požiarov v praxi. Predovšetkým sa jedná o zisťovateľov príčin vzniku požiarov v Hasičskom a záchrannom zbore MV SR, súdnych znalcov z odvetvia zisťovanie príčin vzniku požiarov a policajných vyšetrovateľov.

Predložená publikácia je výstupom riešenia projektu Kultúrnej a edukačnej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky, pre projekt č. 002STU-4/2013 s názvom „Vybudovanie výučbového laboratória pre rekonštrukciu požiarov v laboratórnej mierke“, ktorý bol riešený Ústavom bezpečnosti, environmentu a kvality Materiálovotechnologickej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave a Katedrou protipožiarny ochrany Drevárskej fakulty Technickej univerzity vo Zvolene.

Autori

Úvod

Zisťovanie príčin vzniku požiarov môže byť definované ako vysokoodborná činnosť, ktorej cieľom je na základe faktov o konkrétnom požiari a známych zákonitostí z oblasti prenosu tepla, reakcie materiálov na požiar (teplo), dynamiky rozvoja požiaru a prípadne z ďalších vedných odborov, vedeckými metódami zistiť miesto a príčinu vzniku požiaru. Za príčinu vzniku požiaru sa považujú okolnosti, ktoré zapríčinili vzájomnú interakciu medzi oxidačným prostriedkom, iniciačným zdrojom a prvou zapálenou látkou z ktorej sa požiar rozšíril.

Zisťovanie príčin vzniku požiarov kladie mimoriadne vysoké nároky na odborné vedomosti a praktické skúsenosti zisťovateľa. Pre zisťovanie príčin vzniku požiarov sú okrem postupu samotného zisťovania príčin vzniku požiarov potrebné vedomosti z vybraných právnych predpisov (najmä na úseku ochrany pred požiarmi a trestný zákon), prírodných vied (najmä chémia a fyzika) a technických vied (predovšetkým elektrotechnika a strojný inžinierstvo).

V predkladanej publikácii sú uvedené poznatky potrebné k samostatnému vykonávaniu zisťovania príčin vzniku požiarov spracované v 12 kapitolách: právne aspekty zisťovania príčin vzniku požiarov, iniciácia požiaru a iniciačné zdroje, horľavé látky, oxidačné prostriedky, chémia horenia, dynamika rozvoja vnútorného požiaru, riadenie dymu, stopy po požiari a odber vzoriek, laboratórna analýza vzoriek, požiarotechnické vlastnosti látok a ich využitie v procese zisťovania príčin vzniku požiarov, stanovenie príčiny vzniku požiaru a štatistika požiarovosti.

1

Právne aspekty zisťovania príčin vzniku požiarov

Zisťovanie príčin vzniku požiarov je činnosť, ktorej cieľom je zistiť miesto a príčinu vzniku požiaru, okolnosti ktoré mali vplyv na jeho vznik, šírenie a dopad na životy a zdravie fyzických osôb, úhyn zvierat alebo na životné prostredie.

Požiar je definovaný v § 2 ods. 1 zákona č. 314/2001 Z. z. o ochrane pred požiarimi ako každé nežiaduce horenie, pri ktorom sú bezprostredne ohrozené životy alebo zdravie fyzických osôb alebo zvierat, majetok alebo životné prostredie, pri ktorom vznikajú škody na majetku, životnom prostredí alebo ktorého následkom je zranená alebo usmrtená fyzická osoba alebo zviera.

V úvode tejto kapitoly je potrebné definovať rozdiel medzi odborným termínom **zisťovanie príčin vzniku požiarov** a **vyšetrovanie požiarov**. Ďalej definovaný rozdiel medzi zisťovaním príčin vzniku požiarov a vyšetrovaním požiarov je potrebné chápať striktné v podmienkach právnych predpisov platných v Slovenskej republike, nakoľko predovšetkým v anglosaských štátoch je zaužívaná odlišná terminológia. Problematika rozdielnosti v terminológii medzi právnymi predpismi a technickými normami platnými v Slovenskej republike a v anglosaských štátoch je o to závažnejšou, že v Slovenskej republike dlhodobo chýba vedecká a odborná literatúra z oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov. Následkom tohto nedostatku dochádza k preberaniu poznatkov z odbornej literatúry a technických noriem vydávaných najmä v Spojených štátoch amerických a Spojenom kráľovstve Veľkej Británie a Severného Írska. Nekritické preberanie terminológie z uvedených prameňov je častým zdrojom nepresností.

Nasledujúce časti tejto kapitoly sa budú odvolávať na právne predpisy platné v Slovenskej republike. Pokiaľ nebude výslovne uvedené inak, bude pod právnym predpisom myslené vždy jeho platné znenie (tzn. právny predpis v znení jeho zmien a doplnkov).

1.1.

Vyšetrovanie požiarov

Pred samotným definovaním vyšetrovania požiarov je potrebné definovať **trestný čin** a uviesť vybrané ustanovenia zákona č. 300/2005 Z. z. (trestný zákon). V § 8 je definovaný trestný čin, ako protiprávny čin, ktorého znaky sú uvedené v tomto zákone, ak tento zákon neustanovuje inak. V zmysle § 9 citovaného zákona sa trestný čin delí na **prečin** a **zločin**. Podľa § 10 ods. 1 je prečin:

- a) trestný čin spáchaný z nedbanlivosti alebo
- b) úmyselný trestný čin, za ktorý tento zákon v osobitnej časti ustanovuje trest odňatia slobody s hornou hranicou neprevyšujúcou päť rokov.

Podľa § 11 ods. 1 citovaného zákona je zločin úmyselný trestný čin, za ktorý tento zákon v osobitnej časti ustanovuje trest odňatia slobody s hornou hranicou trestnej sadzby prevyšujúcou päť rokov. Podľa § 11 ods. 3 zločin, za ktorý tento zákon ustanovuje trest odňatia slobody s dolnou hranicou trestnej sadzby najmenej desať rokov, sa považuje za **obzvlášť závažný**.

Trestný čin môže byť spáchaný **úmyselne** alebo **z nedbanlivosti**. Podľa § 15 trestného zákona je trestný čin spáchaný úmyselne, ak páchatel:

- a) chcel spôsobom uvedeným v tomto zákone porušiť alebo ohroziť záujem chránený týmto zákonom, alebo
- b) vedel, že svojím konaním môže také porušenie alebo ohrozenie spôsobiť, a pre prípad, že ho spôsobí, bol s tým uzrozmenný.

Podľa § 16 trestného zákona je trestný čin spáchaný z nedbanlivosti, ak páchatel:

- a) vedel, že môže spôsobom uvedeným v tomto zákone porušiť alebo ohroziť záujem chránený týmto zákonom, ale bez primeraných dôvodov sa spoliechal, že také porušenie alebo ohrozenie nespôsobí, alebo
- b) nevedel, že svojím konaním môže také porušenie alebo ohrozenie spôsobiť, hoci o tom vzhľadom na okolnosti a na svoje osobné pomery vedieť mal a mohol.

V zákone č. 300/2005 Z. z. je priamo požiar uvedený v § 284, 286 a 315.

Podľa § 284 ods. 1 trestného zákona sa za trestný čin považuje konanie osoby ktorá úmyselne:

- a) vydá ľudí do nebezpečenstva smrti alebo ťažkej ujmy na zdraví alebo cudzí majetok do nebezpečenstva škody veľkého rozsahu tým, že spôsobí požiar alebo povodeň, alebo poruchu, či haváriu prostriedku hromadnej prepravy osôb, alebo škodlivý účinnok výbušnín, plynu, elektriny, rádioaktivity alebo iných podobne nebezpečných látok alebo síl, alebo sa dopustí iného podobného nebezpečného konania (všeobecné nebezpečenstvo), alebo
- b) všeobecné nebezpečenstvo zvýši alebo sťaží jeho odvrátenie alebo zmiernenie.

Úmyselné založenie (spôsobenie) požiaru teda v zmysle § 284 trestného zákona patrí medzi úmyselné trestné činy označované ako všeobecné nebezpečenstvo.

Podľa § 285 ods. 1 trestného zákona sa za trestný čin považuje konanie osoby, ktorá z nedbanlivosti spôsobí alebo zvýši všeobecné nebezpečenstvo, alebo sťaží jeho odvrátenie alebo zmiernenie.

Podľa § 286 ods. 1 písm. d) trestného zákona sa za trestný čin považuje úmyselné ohrozenie prevádzky verejného ochranného zariadenia proti požiaru, povodni alebo inej mimoriadnej udalosti.

Podľa § 315 ods. 1 trestného zákona sa za trestný čin považuje konanie osoby, ktorá v úmysle poškodiť ústavne zariadenie alebo obranyschopnosť Slovenskej republiky:

- a) vydá skupinu osôb do nebezpečenstva smrti, ťažkej ujmy na zdraví alebo cudzí majetok do nebezpečenstva škody veľkého rozsahu tým, že spôsobí požiar alebo povodeň, alebo poruchu, či haváriu prostriedku hromadnej prepravy osôb, alebo škodlivý účinnok výbušnín, plynu, elektriny, rádioaktivity alebo iných podobne nebezpečných látok alebo síl, alebo nebezpečenstvo zvýši, alebo sťaží jeho odvrátenie alebo zmiernenie, alebo
- b) dopustí sa iného podobného nebezpečného konania.

Takéto konanie sa v zmysle § 315 trestného zákona označuje ako záškodníctvo.

Úmyselné založenie požiaru, ktorého cieľom je usmrtenie alebo spôsobenie ťažkej ujmy na zdraví osôb alebo spôsobenie škody veľkého rozsahu na cudzom majetku alebo

poškodenie ústavného zariadenia alebo obranyschopnosti Slovenskej republiky je v zmysle § 284 a § 315 trestného zákona úmyselný trestný čin. Zanedbanie povinností, ktoré má za následok vznik požiaru spĺňajúceho definíciu všeobecného nebezpečenstva je v zmysle § 285 ods. 1 trestného zákona trestní čin z nedbanlivosti.

Trestné činy v súvislosti s požiarom však nemusia byť nutne spojené len s jeho spôsobením (úmyselným alebo neúmyselným). Napr. podľa § 158 trestného zákona sa trestného činu dopustí ten, kto inému z nedbanlivosti ublíži na zdraví tým, že poruší dôležitú povinnosť vyplývajúcu z jeho zamestnania, postavenia alebo funkcie uloženú mu podľa zákona. Zanedbanie dôležitej zákonnej povinnosti (napr. zanedbanie povinnosti stanovenej § 5 písm. b) – udržiavanie trvalo voľných únikových ciest zákona č. 314/2001 Z. z.), ktoré v prípade požiaru (bez ohľadu na príčinu jeho vzniku) má za následok ublíženie inému na zdraví, je v zmysle § 158 trestného zákona trestným činom.

Spôsobenie požiaru môže okrem toho byť spojené s úmyslom spáchať iný trestný čin, napr. poisťovací podvod v zmysle § 223 trestného zákona alebo s úmyslom zakryť alebo sťažiť vyšetrovanie iného (často závažnejšieho) trestného činu, napr. úkladnej vraždy alebo vraždy podľa § 144 a § 145 alebo sprenevery podľa § 213 trestného zákona.

Trestné činy v Slovenskej republike **vyšetrujú orgány činné v trestnom konaní** za ktoré sa v zmysle § 10 ods. 1 zákona č. 301/2005 Z. z. (trestný poriadok) považujú prokurátor a policajt. Podľa § 10 ods. 8 trestného poriadku sa policajtom rozumie:

- a) vyšetrovateľ Policajného zboru,
- b) vyšetrovateľ finančnej správy (ak ide o trestné činy v súvislosti s porušením colných predpisov alebo daňových predpisov v oblasti dane z pridanej hodnoty pri dovoze a spotrebných daní),
- c) poverený príslušník Policajného zboru,
- d) poverený príslušník vojenskej polície (v konaní o trestných činoch príslušníkov ozbrojených síl),
- e) poverený príslušník Zboru väzenskej a justičnej stráže (v konaní o trestných činoch príslušníkov Zboru väzenskej a justičnej stráže a v objektoch Zboru väzenskej a justičnej stráže aj jeho zamestnancov a o trestných činoch osôb vo výkone odňatia slobody alebo vo väzbe),
- f) poverený príslušník finančnej správy (ak ide o trestné činy spáchané v súvislosti s porušením colných predpisov alebo daňových predpisov v oblasti dane z pridanej hodnoty pri dovoze a spotrebných daní),
- g) veliteľ námornej konaní o trestných činoch spáchaných na tejto lodi.

Zisťovanie príčin vzniku požiarov môže byť v zmysle tejto podkapitoly považované za súčasť vyšetrovania požiarov (súčasťou vyšetrovania požiaru je zistenie jeho príčiny).

Okrem trestných činov sa osoby v súvislosti so vznikom požiaru alebo zanedbaním povinností súvisiacich s ochranou pred požiarom môžu dopustiť **priestupku**. Priestupok definuje § 2 ods. 1 zákona č. 372/1990 Zb. ako zavinené konanie, ktoré porušuje alebo ohrozuje záujem spoločnosti a je za priestupok výslovne označené v tomto alebo inom zákone, ak nejde o iný správny delikt postihnutelný podľa osobitných právnych predpisov, alebo o trestný čin.

Priestupky vyplývajú z porušenia povinností stanovených zákonom č. 314/2001 Z. z. riešia príslušníci HaZZ na základe § 59 a § 61 citovaného zákona.

1.2.

Zisťovanie príčin vzniku požiarov

Zisťovanie príčin vzniku požiarov vykonávajú príslušníci Hasičského a záchranného zboru Slovenskej republiky na základe § 25 ods. 1 písm. d) zákona č. 314/2001 Z. z. o ochrane pred požiarimi a § 41 ods. 1 vyhl. MV SR č. 121/2002 Z. z. o požiarnej prevencii. Zisťovanie príčin vzniku požiarov Hasičským a záchranným zborom Slovenskej republiky je v zmysle § 25 ods. 1 písm. d) zákona č. 314/2001 Z. z. možné považovať za jeden zo spôsobov výkonu štátneho požiarneho dozoru.

V zmysle § 25 ods. 2 zákona č. 314/2001 Z. z. je orgán vykonávajúci štátny požiarly dozor oprávnený vstupovať do objektov a zariadení právnickej osoby alebo fyzickej osoby – podnikateľa na účely vykonávania protipožiarnej kontroly alebo zisťovania príčin vzniku požiarov v sprievode poverenej osoby a požadovať potrebnú súčinnosť od vedúcich a ostatných zamestnancov právnickej osoby a fyzickej osoby – podnikateľa.

Zisťovanie príčin vzniku požiaru vykonáva:

- Ministerstvo vnútra SR v obzvlášť závažných prípadoch (§ 26 ods. 1 písm. f) zákona č. 314/2001 Z. z.),
- územne príslušné krajské riaditeľstvo HaZZ v závažných prípadoch (§ 27 písm. e) zákona č. 314/2001 Z. z.),
- územne príslušné okresné riaditeľstvo HaZZ v prípadoch, ktoré nepatria do pôsobnosti Ministerstva vnútra ani územne príslušného krajského riaditeľstva HaZZ (§ 28 zákona č. 314/2001 Z. z.).

Výkon činnosti zisťovania príčin vzniku požiarov Hasičským a záchranným zborom upravujú okrem všeobecne záväzných právnych predpisov (zákon č. 314/2001 Z. z. a vyhl. MV SR č. 121/2002 Z. z.) interné predpisy, konkrétne pokyn prezidenta HaZZ č. 60/2002 v znení pokynu prezidenta HaZZ č. 25/2005 (v ďalších častiach bude pokynom prezidenta HaZZ č. 60/2002 myslené jeho platné znenie). Podľa čl. 2 ods. 10 v prílohe č. 1 k pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002 sa za **obzvlášť závažný prípad požiaru** považuje požiar pri ktorom:

- a) boli usmrtené najmenej tri osoby, alebo
- b) bolo zranených najmenej desať osôb, alebo
- c) vznikla priama škoda v sume 331 939 Eur a viac.

Zisťovanie príčin obzvlášť závažného prípadu požiaru zabezpečuje **Ministerstvo vnútra SR** (Prezídium HaZZ) **formou požiarnotechnickej expertízy**.

Podľa čl. 1 ods. 7 písm. b) v prílohe č. 1 k pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002 sa za **závažný prípad požiaru** považuje najmä požiar, pri ktorom:

1. bola usmrtená najmenej jedna osoba, alebo
2. boli zranené najmenej tri osoby, z ktorých aspoň jedna bola zranená ťažko alebo smrteľne, alebo
3. vznikla priama škoda v sume 99 581 Eur a viac.

Zisťovanie príčin vzniku závažného prípadu požiaru zabezpečuje územne príslušné **krajské riaditeľstvo HaZZ formou požiarnotechnickej expertízy**.

Podľa čl. 2 ods. 1 v prílohe č. 1 k pokynu prezidenta č. 60/2002 územne príslušné **okresné riaditeľstvo HaZZ** zabezpečuje zisťovanie príčin vzniku požiarov a ich posúdenie:

- a) príslušníkom zmenovej služby **formou správy o zásahu**,
- b) zisťovateľom **formou odborného posudku**,

- c) príslušníkom zo zmenovej služby (veliteľ zmeny alebo veliteľ družstva) **formou zistenia údajov potrebných na spracovanie odborného posudku a štatistickú evidenciu požiaru.**

V zmysle čl. 2 ods. 1 písm. a) v prílohe č. 1 k pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002 zabezpečuje územne príslušné okresné riaditeľstvo HaZZ zisťovanie príčin vzniku požiarov príslušníkom zmenovej služby formou správy o zásahu pri požiaroch pri ktorých vznikla priama škoda menej ako 331 Eur alebo priama škoda nebola vyčíslená, ale možno predpokladať, že je nižšia ako 331 Eur, ak požiar vznikol v nasledovných priestoroch uvedených v prílohe č. 2 k citovanému pokynu:

- a) poľnohospodárske plochy (obilie na koreni, slama na riadkoch; strnisko, slama pri stohovaní, stohy slamy, krmoviny, neobhospodarované poľnohospodárske plochy),
- b) prírodné prostredie (lesný porast, trávnatý porast, medza, železničný násyp; zvršok, sad; park; trávnatá plocha, záhrada; vinohrad, voľná skladovacia plocha, camping, cesta; jarok, parkovisko; odstavná plocha),
- c) skládky a zber odpadu (skládky odpadov a odpadkov, odpadkový kontajner; nádoba).

V zmysle požiadaviek čl. 2 ods. 1 písm. b) v prílohe č. 1 k pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002 zabezpečuje územne príslušné okresné riaditeľstvo HaZZ zisťovanie príčin vzniku požiarov zisťovateľom formou odborného posudku v ostatných prípadoch.

V zmysle požiadaviek čl. 2 ods. 1 písm. c) v prílohe č. 1 k pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002 zabezpečuje územne príslušné okresné riaditeľstvo HaZZ zisťovanie príčin vzniku požiarov formou zistenia údajov potrebných na spracovanie odborného posudku a štatistickú evidenciu požiarov príslušníkom zmenovej služby (veliteľ zmeny alebo veliteľ družstva) v prípade požiaru, ktorého vznik bol ohlásený v dobe mimo služobného času zisťovateľa, ak jeho následkom vznikla priama škoda s výškou v intervale od 331 Eur do 3319 Eur (vrátane).

Obsah odborného posudku o príčine vzniku požiaru alebo požiarnotechnickej expertízy je uvedený v § 41 ods. 3 vyhl. MV SR č. 121/2002 Z. z. a v prílohe č. 5 k pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002.

V zmysle § 41 ods. 3 vyhl. MV SR č. 121/2002 Z. z. obsahom odborného posudku o príčine vzniku požiaru alebo požiarnotechnickej expertízy sú najmä:

- a) okolnosti, podmienky a časové údaje o vzniku a šírení požiaru,
- b) miesto a príčina vzniku požiaru,
- c) vyhodnotenie porušenia opatrení a povinností podľa osobitných predpisov vrátane návrhu na uloženie sankcie podľa § 59 a 61 zákona č. 314/2001 Z. z.

V zmysle prílohy č. 5 k pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002 odborný posudok alebo správa o výsledku požiarnotechnickej expertízy o príčine a o okolnostiach vzniku požiaru obsahuje:

- a) základné údaje o požiari,
- b) popis situácie pred vznikom a v čase spozorovania požiaru,
- c) miesto (ohnisko) vzniku požiaru,
- d) výsledky skúšok so vzorkami,
- e) príčina vzniku požiaru,
- f) faktory ovplyvňujúce šírenie požiaru,
- g) faktory ovplyvňujúce evakuáciu osôb,
- h) vyhodnotenie organizačného zabezpečenia ochrany pred požiarmi a porušenia predpisov o ochrane pred požiarmi.

Účel zisťovania príčin vzniku požiarov vykonávaný Hasičským a záchranným zborom uvádza § 41 ods. 4 vyhl. MV SR č. 121/2002 Z. z., v zmysle ktorého sa odborné posudky o príčinách vzniku požiarov a požiarnotechnické expertízy využívajú najmä na určenie protipožiarnych opatrení a pri vypracúvaní rozborov požiarovosti.

Okrem príslušníkov HaZZ, ktorý vykonávajú zisťovanie príčin vzniku požiarov na základe zákona NR SR č. 314/2001 Z. z. a vyhlášky MV SR č. 121/2002 Z. z., vykonávajú zisťovanie príčin vzniku požiarov aj znalci z odboru 32 00 00 požiarňa ochrana a odvetvia 32 02 00 zisťovanie príčin vzniku požiarov v zmysle inštrukcie MS SR č. 12/2005. Znalci vykonávajú znaleckú činnosť na základe a spôsobom upraveným zákonom č. 382/2004 Z. z. o znalcoch, tlmočníkoch a prekladateľoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov a vyhl. MS SR č. 490/2004 Z. z. ktorou sa vykonáva zákon č. 382/2004 Z. z. o znalcoch, tlmočníkoch a prekladateľoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov.

V zmysle § 16 ods. 1 zákona č. 382/2004 Z. z. je znalecká činnosť špecializovaná odborná činnosť vykonávaná za podmienok ustanovených týmto zákonom znalcami pre zadávateľa. Úkonmi znaleckej činnosti sú najmä znalecký posudok a jeho doplnok, odborné stanovisko alebo potvrdenie a odborné vyjadrenie a vysvetlenie.

Zisťovanie príčin vzniku požiarov vykonávajú znalci formou znaleckého posudku.

Podľa § 2 ods. 1 zákona č. 382/2004 Z. z. je znalec fyzická osoba alebo právnická osoba splnomocnená štátom na vykonávanie činností podľa tohto zákona, ktorá:

- a) ja zapísaná v zozname znalcov alebo
- b) nezapísaná v tomto zozname, ak je ustanovená za znalca podľa § 15 citovaného zákona.

Podľa § 2 ods. 2 citovaného zákona, vykonáva znalec zapísaný v zozname znalcov svoju činnosť pre súd, iný orgán verejnej moci, fyzickú osobu alebo právnickú osobu (súhrnne označovaných ako zadávateľ). Podľa § 2 ods. 3 citovaného zákona, znalec nezapísaný v zozname znalcov môže vykonávať svoju činnosť len pre súd alebo iný orgán verejnej moci.

Podľa § 5 ods. 1 Ministerstvo spravodlivosti SR zapíše do 60 dní od doručenia písomnej žiadosti o zápis fyzickú osobu do zoznamu znalcov, ktorá:

- a) je spôsobilá na právne úkony v plnom rozsahu,
- b) je bezúhonná,
- c) získala vzdelania v odbore, ktorý je predmetom písomnej žiadosti o zápis,
- d) skončila osobitné vzdelávanie o spôsobe výkonu činnosti podľa tohto zákona (odborné minimum),
- e) vykonáva prax v odbore, ktorý je predmetom činnosti, v trvaní najmenej sedem rokov,
- f) zložila skúšku z odboru alebo odvetvia, ktoré je predmetom žiadosti o zápis a ktorou preukazuje svoju odbornú spôsobilosť (odborná skúška),
- g) úspešne skončila špecializované vzdelávanie, ak ide o zápis do zoznamu pre odbor alebo odvetvie, v ktorom je takéto vzdelávanie ustanovené vykonávacím predpisom,
- h) má materiálne vybavenie postačujúce na výkon činnosti v odbore alebo odvetví, ktoré je predmetom písomnej žiadosti o zápis,
- i) nebola v posledných troch rokoch právoplatne vyčiarknutá zo zoznamu podľa § 27 ods. 3 písm. d) tohto zákona alebo jej nebol uložený zákaz činnosti podľa § 27 ods. 3 písm. c) tohto zákona,
- j) zložila sľub.

Podľa § 15 ods. 1 zákona č. 382/2004 Z. z. v konaní pred súdom alebo iným orgánom verejnej moci možno ustanoviť za znalca aj osobu, ktorá nie je zapísaná v zozname, ak s ustanovením súhlasí a:

- a) v príslušnom odbore alebo odvetví nie je zapísaná žiadna iná osoba alebo
- b) osoba zapísaná v zozname nemôže úkon vykonať alebo vykonanie úkonu by bolo spojené s neprimeranými ťažkosťami alebo nákladmi.

Okrem uvedených prípadov, je zisťovanie príčin vzniku požiarov možné vykonávať aj na základe zákona č. 473/2005 Z. z. o poskytovaní služieb v oblasti súkromnej bezpečnosti a o zmene a doplnení niektorých zákonov (zákon o súkromnej bezpečnosti).

Podľa § 2 ods. 1 citovaného zákona sú druhy bezpečnostnej služby:

- a) strážna služba,
- b) profesionálna cezhraničná preprava eurovej hotovosti cestnou dopravou,
- c) detektívna služba,
- d) odborná príprava a poradenstvo.

V zmysle § 4 ods. 1 citovaného zákona, detektívnou službou je:

- a) hľadanie osoby,
- b) hľadanie majetku,
- c) získavanie údajov, ktoré môžu slúžiť ako dôkazný prostriedok v konaní pred súdom alebo správnym orgánom,
- d) získavanie údajov o osobnom stave fyzickej osoby a získavanie informácií o konaní fyzickej osoby alebo právnickej osoby alebo o ich majetkových pomeroch,
- e) získavanie informácií v súvislosti s vymáhaním pohľadávky alebo,
- f) získavanie údajov o protiprávnom konaní ohrozujúcom obchodné tajomstvo.

Pod písmeno c) (získavanie údajov, ktoré môžu slúžiť ako dôkazný prostriedok v konaní pred súdom alebo správnym orgánom) môžu byť zaradené aj činnosti spojené so zisťovaním príčin vzniku požiarov. Táto činnosť sa vykonáva v súlade so zákonom č. 473/2005 Z. z. a vyhl. MV SR č. 634/2005 Z. z.

Okrem uvedených prípadov, keď zisťovanie príčin vzniku požiarov upravujú právne predpisy platné v Slovenskej republike, je potrebné dodať, že zisťovanie príčin vzniku požiarov môžu vykonávať aj právnické osoby, fyzické osoby – podnikatelia a fyzické osoby. Možnosť vykonávať zisťovanie príčin vzniku požiarov právnickými osobami, fyzickými osobami – podnikateľmi a fyzickými osobami vyplýva z čl. 2 ods. 3 zákona č. 460/1992 Zb. (Ústava Slovenskej republiky) podľa ktorého každý môže konať, čo nie je zákonom zakázané a nikoho nemožno nútiť, aby konal niečo, čo zákon neukladá. Zisťovanie príčin vzniku požiarov na základe citovaného právneho predpisu je možné vykonávať predovšetkým pre internú potrebu. Zisťovanie príčin vzniku požiarov pre internú potrebu sa týka predovšetkým právnických osôb, ktoré môžu takto získané údaje využiť predovšetkým pri tvorbe a novelizácii interných predpisov.

1.3.

Terminológia v oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov v NFPA 921:2014

Ako bolo uvedené v úvode tejto kapitoly, medzi odbornou terminológiou v zisťovaní príčin vzniku požiarov v Slovenskej republike a v anglosaských štátoch existuje viacero významných rozdielov. Nakoľko do našej odbornej literatúry z oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov sú často preberané poznatky z anglosaských štátov je táto podkapitola zameraná na prehľad terminológie používanej v Spojených štátoch amerických. Cieľom

tejto podkapitoly je poskytnúť čitateľovi informácie, potrebné pre preberanie údajov zo zahraničnej odbornej literatúry (predovšetkým z anglosaských štátov). V ďalších kapitolách však bude používaná terminológia platná v Slovenskej republike, okrem prípadov, kedy bude na túto skutočnosť výslovne upozornené. Ako reprezentatívny prameň odbornej terminológie v oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov bola zvolená technická norma NFPA 921:2014, ktorú vydáva Národná asociácia požiarnej ochrany (National Fire Protection Association), ktorá je široko používaná a akceptovaná nie len v Spojených štátoch amerických, ale vo väčšine vyspelých štátov sveta.

Analýza požiaru (Fire Analysis) je proces určenia miesta vzniku, príčiny, spôsobu rozvoja, zodpovednosti a keď je to požadované aj poruchovej analýzy požiaru alebo explózie (NFPA 921:2014).

Príčina požiaru (Fire Cause) sú okolnosti, podmienky alebo vplyvy ktoré umožnili spolupôsobenie paliva, iniciačného zdroja a oxidačného prostriedku (napr. vzduchu alebo kyslíka) za vzniku požiaru alebo explozívneho horenia (NFPA 921:2014).

Vyšetrovanie požiarov (Fire Investigation) je proces určenia miesta vzniku, príčiny a rozvoja požiaru alebo explózie.

Forenzné vedy (Forensics Science) je aplikácia vedy na zodpovedanie otázok pre právny systém (NFPA 921:2014).

Plocha vzniku požiaru (Area of Origin) je konštrukcia, časť konštrukcie alebo geografická poloha v rámci ktorej je opodstatnené očakávať, že sa nachádza miesto vzniku požiaru (NFPA 921:2014).

Miesto vzniku (Point of Origin) je presné miesto, v rámci plochy vzniku požiaru, kde vznikol požiar alebo explózia následkom vzájomného pôsobenia paliva a zdroja tepla (NFPA 921:2014).

Poruchová analýza (Failure Analysis) je logické a systematické posúdenie prvku, komponentu, zostavy alebo konštrukcie a jej umiestnenia a funkcie v systéme vykonané za účelom identifikácie a analýzy pravdepodobnosti, príčin a dôsledkov potenciálnych alebo skutočných porúch (NFPA 921:2014).

Z porovnania terminológie v oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov v Slovenskej republike s terminológiou podľa NFPA 921:2014 vyplýva, že ekvivalentným termínom k zisťovaniu príčin vzniku požiarov v zmysle právnych predpisov platných v Slovenskej republike je termín Fire Investigation (vyšetrovanie požiarov) aj Fire Analysis (analýza požiaru).

Pre zisťovanie príčin vzniku požiarov, ktoré nevykonávajú orgány činné v trestnom konaní ani Hasičský a záchranný zbor je ekvivalentným odborným termínom Fire Investigation (nakolko v zmysle definície táto činnosť zahŕňa len určenie miesta vzniku, príčiny a rozvoja požiaru pričom, napriek slovu investigation¹ v názve, nezahŕňa určenie zodpovednosti).

Pre vyšetrovanie požiarov vykonávané orgánmi činnými v trestnom konaní a zisťovanie príčin vzniku požiarov vykonávané Hasičským a záchranným zborom je ekvivalentným termínom Fire Analysis (nakolko v zmysle definície táto činnosť zahŕňa určenie miesta vzniku, príčiny, spôsobu rozvoja, zodpovednosti a kde je to požadované aj vypracovanie poruchovej analýzy požiaru alebo výbuchu). Pokiaľ je v súvislosti s požiarom podozrenie

¹ Na tomto mieste je potrebné upozorniť, že anglické slovo „Investigation“ má okrem najpoužívanejšieho významu „vyšetrovanie“ aj ďalšie významy, napr. „skúmanie“, ktoré v slovnom spojení „Fire Investigation“ lepšie vystihuje jeho význam.

na spáchanie trestného činu, tento je vyšetrovaný orgánmi činnými v trestnom konaní a pojem vyšetrovanie požiaru môže byť stotožnený s termínom Fire Analysis v zmysle NFPA 921:2014 (nakoľko tento termín zahŕňa aj určenie zodpovednosti). Zodpovednosť za priestupky v súvislosti s požiarom rieši Hasičský a záchranný zbor a zodpovednosť pri podozrení na spáchanie trestného činu orgány činné v trestnom konaní.

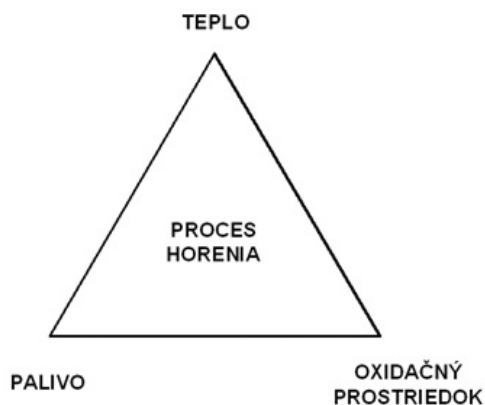
K určitým otázkam, ktoré majú súvis s mierou zodpovednosti v súvislosti s požiarom sa môžu vyjadriť v znaleckom posudku aj znalci z odvetvia 32 02 00 zisťovanie príčin požiarov, prípadne znalci z odboru 32 00 00 požiarňa ochrana, vykonávajúci svoju činnosť na základe zákona č. 382/2004 Z. z. a vyhl. MS SR č. 490/2004 Z. z., preto aj ich činnosť môže byť v zmysle terminológie NFPA 921:2014 považovaná za Fire Analysis. Rovnako osoby vykonávajúce pátranie podľa zákona č. 473/2005 Z. z. a vyhl. MV SR č. 634/2005 Z. z. môžu získavať údaje, ktoré môžu slúžiť ako dôkazový prostriedok v konaní pred súdom alebo správnym orgánom o miere zodpovednosti v súvislosti s požiarom. Ekvivalentný termín pre takúto činnosť v zmysle NFPA 921:2014 je takisto Fire Analysis.

2

Iniciácia požiaru a iniciačné zdroje

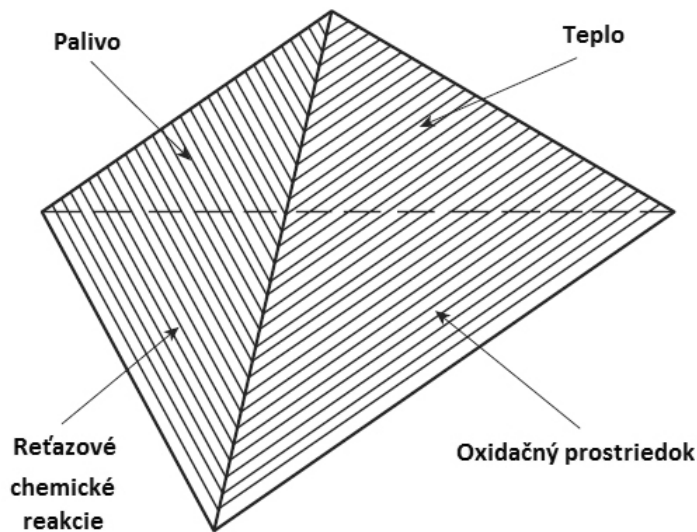
Najdôležitejšou fázou rozvoja požiaru je jeho iniciácia, nakoľko ak nedôjde k iniciácii nevznikne ani samotný požiar (Babrauskas 2003). Uvedený záver platí zvlášť pri zisťovaní príčin vzniku požiaru, ktorého hlavným cieľom je zistiť miesto vzniku a príčinu požiaru. Každý požiar vznikne v konkrétnom čase pôsobením konkrétneho iniciačného zdroja na konkrétnu horľavú látku (palivo) za prítomnosti oxidačného prostriedku. Výnimku predstavuje len samovznietenie, pri ktorom požiar vzniká samovznietením konkrétnej horľavej látky. Určenie horľavej látky, ktorá začala horieť ako prvá a iniciačného zdroja, ktorý ju zapálil, prípadne podmienok jej iniciácie (v prípade samovznietenia) je kľúčovou časťou stanovenia príčiny vzniku požiaru.

Pre vznik požiaru (procesu horenia) je potrebná vzájomná interakcia horľavej látky (paliva), tepla (iniciačného zdroja) a oxidačného prostriedku, tak ako to vyjadruje klasický trojuholník horenia znázornený na obr. 2-1. Uvedené podmienky pre vznik procesu horenia platia aj pre samovznietenie, nakoľko aj pre vznik procesu samovznietenia je potrebné určité teplo. Potreba tohto tepla je v prípade samovznietenia krytá teplom privedeným z okolia alebo teplom uvoľneným exotermickou chemickou reakciou (napr. reakcia alkalického kovu s vodou), fyzikálnym procesom (napr. adsorpcia) alebo biologickým procesom (napr. činnosť mikroorganizmov).



Obrázok 2-1 Klasický trojuholník horenia

V NFPA 921:2014 sú nevyhnutné podmienky pre vznik požiaru vyjadrené prostredníctvom štvorstenu ohňa (obr. 2-2). V štvorstene ohňa je namiesto procesu horenia uvedený odborný termín reťazové reakcie horenia. Uvedené odborné termíny sú však ekvivalentné (horenie je reťazová chemická reakcia) preto môže byť štvorsten horenia považovaný za ekvivalent trojuholníka horenia.



Obrázok 2-2 Štvorsten ohňa (NFPA 921:2014)

2.1. Prenos tepla

Existujú tri spôsoby prenosu tepla:

- vedením (kondukciou),
- prúdením (konvekciou),
- žiarením (radiáciou).

Počas požiaru sa uplatňuje predovšetkým prenos tepla prúdením a žiarením. Prenos tepla prúdením je dominantný vo fáze lokálneho požiaru a prenos tepla žiarením sa stáva dominantným vo fáze prechodu z lokálneho do plne rozvinutého požiaru a vo fáze plne rozvinutého požiaru. Pri iniciácii požiaru môže zohrať dôležitú úlohu ktorýkoľvek mechanizmus prenosu tepla alebo ich ľubovoľná kombinácia.

2.1.1. Prenos tepla vedením

Prenos tepla vedením (kondukciou) sa uskutočňuje v dôsledku pohybu a vzájomnej interakcie základných častíc hmoty (napr. molekuly, atómy, voľné elektróny apod.). Molekuly s vyššou teplotou, t.j. s vyššou kinetickou energiou, odovzdávajú časť svojej energie susedným molekulám s nižšou teplotou. Vedením sa teplo šíri v tuhých látkach a nepohybujúcich sa tekutinách (kvapalinách a plynch), pričom dochádza len k prenosu energie (Taraba a kol. 2004).

Všeobecne je teplota v danom mieste telesa (priestoru) funkciou priestorových súradníc (x, y, z) a času (τ), čo matematicky vyjadruje rovnica [2.1]. Za bežných podmienok

sa teplota neustále mení (s polohou a/alebo časom). Teplotné pole, ktoré sa nemení s časom a je len funkciou polohy sa nazýva *ustálené* alebo *stacionárne*. Teplotné pole, ktoré sa mení s časom sa nazýva *neustálené* alebo *nestacionárne*. Okrem toho rozlišujeme teplotné polia *jednorozmerné*, kedy $t = f(x)$, *dvojjrozmerné*, kedy $t = f(x, y)$ a *trojrozmerné*, kedy $t = f(x, y, z)$ (Bahýl a Igaz 2010).

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (^\circ\text{C}) \quad [2.1]$$

Spojením bodov s rovnakou teplotou sa v teplotnom poli vytvorí izotermická čiara (v jednorozmerných poliach) alebo izotermická plocha (vo viacrozmerných teplotných poliach). Každým bodom telesa môže prechádzať iba jedna izotermická čiara (plocha), pretože v danom okamihu môže mať každý bod iba jednu hodnotu teploty. Zmena teploty na jednotku dĺžky sa nazýva gradient teploty a má vždy smer kolmice k izotermickej čiare (ploche) v smere kladného prírastku teploty. Záporná hodnota gradientu teploty sa nazýva teplotný spád. Šírenie tepla vedením je charakterizované hustotou tepelného toku ktorý je matematicky vyjadrený prvým Fourierovým zákonom (1822) [2.2], ktorý udáva vzťah medzi hustotou tepelného toku a gradientom teploty. Záporné znamienko vyjadruje fakt, že tepelný tok má opačný smer ako gradient teploty (Bahýl a Igaz 2010).

$$q_k = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}) \quad [2.2]$$

q_k : hustota tepelného toku prenášaného vedením ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

λ : koeficient tepelnej vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

grad T : gradient teploty ($\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$)

Koeficient tepelnej vodivosti nemá pre konkrétny materiál konštantnú hodnotu, ale jeho veľkosť závisí od jeho fyzikálnych vlastností (predovšetkým od teploty, objemovej hmotnosti a vlhkosti). Orientačné hodnoty koeficienta tepelnej vodivosti pre vybrané skupiny látok sú znázornené v tabuľke 2.1. Vo všeobecnosti platí, že materiály s vysokou elektrickou vodivosťou vykazujú aj vysokú tepelnú vodivosť (tento záver však neplatí vždy).

Tabuľka 2-1 Hodnoty koeficienta tepelnej vodivosti pre vybrané skupiny látok

Materiály	Plyny	Kvapaliny	Stavebné látky	Izolanty	Kovy
λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0,005 – 0,5	0,09 – 0,7	0,02 – 3	0 – 0,2	2 – 400

Prameň: Taraba a kol. 2004

Pri výpočtoch pri ktorých sa uvažuje s významnou zmenou teploty, by dosadenie hodnoty koeficienta tepelnej vodivosti platného len pre jednu konkrétnu teplotu bolo zdrojom významnej nepresnosti. V takýchto prípadoch sa počíta tzv. stredná hodnota koeficienta tepelnej vodivosti podľa rovnice [2.3], ktorú bližšie popisujú napr. Taraba a kol. (2004).

$$\lambda_{\text{str}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \lambda \, dt \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}) \quad [2.3]$$

λ_{str} : stredná hodnota koeficienta tepelnej vodivosti v intervale teplôt od t_1 do t_2 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

t_1 : dolná hodnota intervalu teplôt v ktorom sa stanovuje λ_{str} ($^\circ\text{C}$)

t_2 : horná hodnota intervalu teplôt v ktorom sa stanovuje λ_{str} ($^\circ\text{C}$)

V trojrozmernom teplotnom poli je tepelný tok vyjadrený prvým Fourierovým zákonom v tvare [2.4], ktorá platí pre izotropný materiál, ktorého hodnota súčiniteľa prestupu tepla sa nemení v závislosti od smeru tepelného toku. V prípade anizotropných materiálov je potrebné v rovnici [2.4] uvažovať s inou hodnotou koeficienta tepelnej vodivosti osobitne pre každý smer (Bahýl a Igaz 2010).

$$q_k = -\lambda \cdot \left(i \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + j \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + k \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad [2.4]$$

t : teplota ($^{\circ}\text{C}$)

i, j, k : jednotkové vektory v smere osí x, y, z (-)

Pri neustálenom teplotnom poli platí Fourierov zákon v tvare [2.5], ktorý definuje vzťah medzi zmenou teploty (ľavá strana) a priestorovou zmenou teploty (pravá strana) (Bahýl a Igaz 2010).

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (\text{K.s}^{-1}) \quad [2.5]$$

τ : čas (s)

a : koeficient teplotnej vodivosti ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

Koeficient teplotnej vodivosti vyjadruje zmenu teploty vo vnútri objemu látky pri zmene teploty na povrchu alebo v inom mieste objemu. Čím je jeho hodnota vyššia tým rýchlejšie sa mení teplota vo vnútri telesa vzhľadom na zmeny na povrchu. Koeficient teplotnej vodivosti sa počíta podľa rovnice [2.6] (Bahýl a Igaz 2010).

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (\text{m}^2.\text{s}^{-1}) \quad [2.6]$$

c : špecifická tepelná kapacita ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

ρ : objemová hmotnosť (kg.m^{-3})

Celkový tepelný tok pri jednorozmernom stacionárnom vedení tepla rovinnou stenou sa počíta podľa rovnice [2.7].

$$Q_k = q_k \cdot A \quad (\text{W}) \quad [2.7]$$

Q_k : celkový tepelný tok prenášaný vedením (W)

A : plocha cez ktorú dochádza k prenosu tepla tepelným vedením (m^2)

Hustota tepelného toku pri jednorozmernom stacionárnom vedení tepla rovinnou stenou (jednoduchou alebo zloženou) sa počíta podľa rovnice [2.8].

$$q_k = \frac{t_h - t_c}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad [2.8]$$

t_h : teplota na ohrievanej strane rovinatej steny ($^{\circ}\text{C}$)

t_c : teplota na ochladzovanej strane rovinatej steny ($^{\circ}\text{C}$)

δ_i : hrúbka jednoduchkej steny alebo i -tej vrstvy zloženej steny (m)

λ_i : koeficient tepelnej vodivosti jednoduchkej steny alebo i -tej vrstvy zloženej steny ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Aj keď pri riešení parciálnych problémov v oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov nachádza uplatnenie aj stacionárny prenos tepla vedením a za určitých okolností ním môžu byť s dostatočnou presnosťou aproximované podmienky počas iníciaie, podstatne širšiu oblasť aplikácie má nestacionárny prenos tepla vedením.

Nestacionárne procesy vedenia tepla je možné charakterizovať pomocou kritérií podobnosti a riešenie Fourierovej-Kirchhoffovej diferenciálnej rovnice vedenia tepla [2.9] zapísať v tvare funkcie podobnostných čísel [2.10] (Taraba a kol. 2007).

$$\rho \cdot c \cdot \frac{dt}{d\tau} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda_x \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda_y \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda_z \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] + q_v \quad (\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}) \quad [2.9]$$

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$: koeficient tepelnej vodivosti v smere súradnicových osí ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

q_v : energia uvoľnená z jednotky objemu telesa za jednotku času (W.m^{-3})

$$\Theta = f(X, \text{Bi}, \text{Fo}) \quad (-) \quad [2.10]$$

Θ : bezrozmerná teplota, definovaná rovnicou [2.11] (-)

X : bezrozmerná súradnica (-)

Bi : Biotovo číslo, ktoré sa počíta podľa rovnice [2.12] (-)

Fo : Fourierovo číslo, ktoré sa počíta podľa rovnice [2.13] (-)

$$\Theta = \frac{t - t_h}{t_0 - t_h} \quad (-) \quad [2.11]$$

t : teplota v materiáli v súradnici X po čase τ ($^{\circ}\text{C}$)

t_h : teplota prostredia alebo média ohrievajúceho materiál ($^{\circ}\text{C}$)

t_0 : počiatočná teplota materiálu ($^{\circ}\text{C}$)

$$\text{Bi} = \frac{h \cdot L}{\lambda} \quad (-) \quad [2.12]$$

h : koeficient prestupu tepla (bližšie popísaný v podkapitole 2.1.2) ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

L : charakteristický rozmer – v prípade rovinatej steny sa rovná polovici jej hrúbky (m)

$$\text{Fo} = \frac{a \cdot \tau}{L^2} \quad (-) \quad [2.13]$$

Bezrozmerná teplota pre nekonečne dlhú rovinnú stenu sa počíta podľa rovnice [2.14]. Ak platí $\text{Fo} \geq 0,3$ stačí v rovnici [2.14] aplikovať len prvý člen radu (Taraba a kol. 2007).

$$\Theta = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot \cos(\beta_i \cdot \frac{x}{b}) \cdot e^{-\beta_i^2 \cdot \text{Fo}} \quad (-) \quad [2.14]$$

A_i : konštanta definovaná rovnicou [2.15] (-)

β_i : korene charakteristickej rovnice $\text{tg } \beta = \text{Bi}/\beta$ (rad)

$$A_i = \frac{2 \sin \beta_i}{\beta_i + \sin \beta_i \cdot \cos \beta_i} \quad (-) \quad [2.15]$$

Hodnoty koreňov β_i a konštánt A_i pre dosku sú uvedené v prílohe B.

Taraba a kol. (2007) delia úlohy spojené s nestacionárnym vedením tepla na úlohy

I. typu a úlohy II. typu. Úlohou I. typu je určenie teploty v danom čase a úlohou II. typu je určenie času ohrevu alebo ochladzovania.

Postup riešenia úloh I. typu pre rovinnú stenu (Taraba a kol. 2007):

1. stanovenie charakteristického rozmeru L (polovica hrúbky dosky),
2. výpočet Biotovho čísla podľa rovnice [2.12],
3. výpočet Fourierovho čísla podľa rovnice [2.13],
4. výpočet bezrozmernej teploty podľa rovnice [2.14],
5. výpočet teploty podľa rovnice [2.11].

Postup riešenia úloh II. typu pre rovinnú stenu (Taraba a kol. 2007):

1. stanovenie charakteristického rozmeru L (polovica hrúbky dosky),
2. výpočet Biotovho čísla podľa rovnice [2.12],
3. výpočet bezrozmernej teploty podľa rovnice [2.11],
4. výpočet Fourierovho čísla podľa rovnice [2.14], [2.16] alebo [2.17],
5. výpočet času z rovnice [2.13].

V prípadoch, keď je Biotovo číslo menšie ako 0,1 (teplota v strede telesa v ľubovoľnom čase sa približne rovná povrchovej teplote) je bezrozmernú teplotu v rovinnnej stene možné vypočítať zjednodušeným spôsobom podľa rovnice [2.16]. Ak je Biotovo číslo vyššie ako 100 (povrchová teplota v ľubovoľnom čase sa približne rovná teplote okolia, je bezrozmernú teplotu v strede možné určiť zo zjednodušenej rovnice [2.17]. V prípadoch, keď platí $Fo \geq 0,3$, stačí aplikovať prvý člen radu (Taraba a kol. 2007).

$$\theta = e^{-Bi \cdot Fo} \quad (-) \quad [2.16]$$

$$\theta = \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot Fo} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot e^{-8\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot Fo} + \frac{1}{5} \cdot e^{-24\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot Fo} - \frac{1}{7} \cdot e^{-48\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot Fo} + \dots \right] \quad (-) [2.17]$$

V prípade polohraničeného telesa (polomasívu) sa bezrozmerná teplota, pri skokovej zmene teploty na jednej strane jeho povrchu počíta podľa rovnice [2.18], pri zaťažení jednej strany tepelným žiarením s hustotou tepelného toku q_i podľa rovnice [2.19] a pri zaťažení jednej strany tekutinou (plynom alebo kvapalinou) s teplotou t_h podľa rovnice [2.20] (Taraba a kol. 2007).

$$\Theta = \frac{t - t_p}{t_0 - t_p} = \text{erf}(z) = \text{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}\right) = \text{erf}\left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{Fo}}\right), \text{ kde } z = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}} \quad (-) \quad [2.18]$$

t_p : teplota na jednej strane povrchu polomasívu po jej skokovej zmene ($^{\circ}\text{C}$)

$\text{erf}(z)$: Gaussova chybová funkcia, ktorá sa počíta podľa rovnice [2.21]

x : hĺbka (pod povrchom materiálu na ktorej nastala skoková zmena teploty) v ktorej sa počíta teplota (m)

$$t - t_0 = \frac{2 \cdot q_s \cdot \sqrt{a \cdot t}}{\sqrt{\pi \cdot \lambda}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) - \frac{q_s \cdot x}{\lambda} \cdot \left[1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}\right)\right] \quad (^{\circ}\text{C}) \quad [2.19]$$

$$\Theta = \frac{t - t_h}{t_0 - t_h} = \text{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}\right) + \left[1 - \text{erf}\left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{Fo}} + Bi \sqrt{Fo}\right)\right] \cdot \exp(-Bi^2 \cdot Fo - Bi) \quad (-) [2.20]$$

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-x^2} dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(z - \frac{z^3}{3 \cdot 1!} + \frac{z^5}{5 \cdot 2!} - \frac{z^7}{7 \cdot 3!} + \dots\right) \quad (-) \quad [2.21]$$

Pri výpočte času potrebného na ohrev stanoveného bodu na určitú teplotu v polohraničenom telese (polomasíve) sa najskôr určí bezrozmerná teplota podľa rovnice [2.18], ktorá je rovná hodnote $\text{erf}(z)$. Pre hodnotu $\text{erf}(z)$ sa určí hodnota argumentu z tabuľky v prílohe C. Čas potrebný na ohrev bodu v polomasíve na určitú teplotu sa následne vypočíta z definičného vzťahu argumentu z , tak ako je definovaný v rovnici [2.18].

Prenos tepla vedením sa v požiarnom inžinierstve a dynamike rozvoja požiaru vo väčšine prípadov zanedbáva. V oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov však nemôže byť zanedbaný ani tento spôsob prenosu tepla. Vedenie tepla môže spôsobiť iniciáciu látok (a následný požiar) často aj vo veľkej vzdialenosti od miesta pôsobenia iniciálneho zdroja. Typickým príkladom je zváranie kovových častí, ktoré prechádzajú cez viac požiarnych úsekov alebo priestorov stavby (napr. oceľové stavebné konštrukcie, súčasti ústredného kúrenia, rozvodu vody a rôzne technologické potrubia), ktoré dokážu rýchlo šíriť teplo vedením a následne spôsobiť požiar ohriatím horľavej látky v priestore častokrát aj veľmi vzdialenom od miesta pôsobenia iniciálneho zdroja. Ďalší jav v súvislosti s vedením tepla, ktorý sa pri zisťovaní príčin vzniku požiaru musí zobrať do úvahy je prenos požiaru následkom ohrevu uvedených konštrukcií. K takejto situácii môže dôjsť napr. v prípade, keď požiar vznikne v jednom požiarnom úseku a tento ohreje kovové časti prestupujúce do iného požiarného úseku na takú teplotu, že od týchto sa vznieti horľavá látka, ktorá bola s ňou v kontakte a spôsobí ďalší požiar. V tomto prípade sa s vysokou mierou pravdepodobnosti nájdu stopy po dvoch miestach vzniku požiaru z čoho bude vyplývať, že požiar vznikol na dvoch miestach v priebehu krátkeho časového intervalu. Ak sa však pri zisťovaní príčin vzniku požiaru správne nevyhodnotí možnosť iniciácie druhého (následného alebo sekundárneho) požiaru následkom prenosu tepla tepelným vedením, môžu byť dva požiare v jednej stavbe vzniknuté na rôznych miestach v relatívne krátkom časovom intervale nesprávne považované za indikáciu úmyselného spôsobenia požiaru.

Prenos tepla vedením má vplyv aj na proces iniciácie materiálu. Odolnosť materiálu voči iniciácii narastá s narastajúcou možnosťou odvodu tepla z jeho exponovaného povrchu. Ak sú rozmery materiálu rádovo väčšie ako rozmer na ktorý pôsobí iniciálny zdroj alebo ak sa jedná o tepelne hrubý materiál, tak sa počas iniciácie na odvode tepla z exponovaného povrchu významným spôsobom podieľa aj vedenie tepla z exponovaného povrchu smerom k neexponovanej strane. Odolnosť materiálu voči iniciácii narastá s narastajúcou hodnotou tepelnej vodivosti, špecifickej tepelnej kapacity a hustoty (podobné myšlienky uvádza Osvald 1997). Súčin koeficienta tepelnej vodivosti, hustoty a špecifickej tepelnej kapacity $\lambda \cdot \rho \cdot c$ ($\text{W}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) sa v požiarnom inžinierstve nazýva tepelná inercia². Podľa Madrzykowského a Stroupa (2008) tepelná inercia charakterizuje rýchlosť nárastu povrchovej teploty termicky zaťaženého materiálu.

Základné tepelno-technické vlastnosti vybraných kovov sú uvedené v tabuľke 2-2 a vybraných nekovových materiálov v tabuľke 2-3. Rovnica pre výpočet špecifickej tepelnej kapacity látok pri konkrétnych teplotách [2.39] a koeficienty pre výpočet tepelnej kapacity vybraných látok (tab. 2-6) sú uvedené v podkapitole 2.1.3.1.

² Odborný termín tepelná inercia sa v iných oblastiach vedy a techniky (predovšetkým technická termodynamika) používa pre označenie súčinu tepelnej vodivosti, hustoty a špecifickej tepelnej kapacity umocnenej na $\frac{1}{2}$. V požiarnom inžinierstve sa však termínom tepelná inercia označuje uvedený súčin bez umocnenia. Tepelná inercia je dôležitým parametrom v požiarnom inžinierstve používaným pri výpočte času do zapálenia materiálov zaťažených tepelným žiarením s definovanou hustotou tepelného toku a pri modelovaní šírenia plameňa. Nakoľko uvedené parametre nachádzajú významné uplatnenie aj pri zisťovaní príčin vzniku požiarov, bude v predkladanej publikácii zachovaná terminológia požiarného inžinierstva.

Tabuľka 2-2 Závislosť tepelnej vodivosti od teploty vybraných kovov

Materiál	Teplota (°C)	Hustota (kg.m⁻³)	Tepelná vodivosť (W.m⁻¹.K⁻¹)
Hliník (99,75%)	-190	2 700	255,86
	0		229,111
	200		229,111
	300		222,133
	800		125,604
Antimón	0	6 690	17,678
	100		16,282
	300		15,871
Meď (elektrolytická)	0	8 900	395,42
	100		391,931
	300		381,464
Zlato (99,999%)	0	19 290	310,521
	100		31,,521
	300		304,76
Olovo	0		35,123
	20		34,774
	100		33,378
	300		29,773
	500		16,747
Nikel (99,94%)	0	8 800	93,04
	100		82,573
	300		63,965
Striebro (99,98%)	0	10 500	418,68
	100		416,354
	300		407,05
Volfrám	0	19 300	166,309
	100		151,19
	500		119,789
	1000		98,855
	1500		113,974
Zinok	0	7 130	112,811
	100		109,904
	300		101,181

Prameň: Vargaftik a kol. (1996) a Rohsnow a kol. (1998)

Tabuľka 2-3 Základné tepelno-technické vlastnosti nekovových materiálov pri teplote 300 K

Materiál	Hustota (kg.m ⁻³)	Tepelná vodivosť (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Hmotnostná tepelná kapacita (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Asfalt	2115	0,062	920
Bakelit	1300	1,4	1465
Bavlna	80	0,06	1300
Cementová malta	1860	0,72	780
Drevotrieková doska s nízkou hustotou	590	0,078	1300
Drevotrieková doska s vysokou hustotou	1000	0,17	1300
Extrudovaný polystyrén	55	0,027	1210
Ihličnaté drevo (borovica)	510	0,12	1380
Korok	120	0,039	1800
Listnaté drevo (dub, javor)	720	0,16	1255
Papier	930	0,011	1340
Parafín	900	0,02	2890
Plná pálená tehla	1920	0,72	835
Preglejka	545	0,12	1215

Prameň: Incropera a De Witt (1990) a Rohsenow a kol. (1998)

2.1.2.

Prenos tepla prúdením

Prúdením (konvekciou) sa teplo šíri v tekutinách (kvapalinách a plynoch). Prenos tepla v tomto prípade prebieha makropohybom atómov a molekúl látky, pričom súčasne prenášajú aj teplo. Tento proces v sebe zahŕňa dva javy a to **prenos tepla vedením pri styku dvoch častíc** (atómov alebo molekúl) a **prenos tepla prúdením pri pohybe častíc a objemov látky, ktoré prenášajú svoju vnútornú energiu** (Bahýl a Igaz 2010).

Pokiaľ je prúdenie tekutín spôsobené len gradientom teploty, hovoríme o **voľnej (prirodzenej) konvekcii**. Ak je prúdenie vyvolané gradientom tlaku, ide o **nútenú konvekciu** (Taraba a kol. 2007). Výmena tepla vyvolaná prúdením tekutiny okolo povrchu tuhej látky sa nazýva **prestup tepla** (Bahýl a Igaz 2010). Teplo môže preštvovať buď z tekutiny do tuhej látky (ak má vyššiu teplotu tekutina) alebo z tuhej látky do tekutiny (ak má vyššiu teplotu tuhá látka). Pri zisťovaní príčin vzniku požiarov sa môžeme stretnúť s obidvomi uvedenými prípadmi. Prvý prípad reprezentuje termické zaťaženie a následnú iničiáciu horľavej látky prúdom horúcej tekutiny (najčastejšie vzduchu). Ako príklad je možné uviesť iničiáciu materiálu prúdom horúceho vzduchu z teplovzdušnej pištole alebo šírenie požiaru ohrevom stavebných konštrukcií horúcimi splodinami horenia. Druhý prípad reprezentuje odvádzanie tepla z látky alebo zariadenia (ochladzovanie). Typickým príkladom je prenos tepla prúdením vzduchu z elektrotepeľného spotrebiča alebo elektroinštalácie. Zhoršenie podmienok prúdenia (napr. zakrytím elektrotepeľného spotrebiča textilom) môže spôsobiť kumuláciu tepla iničiáciu textilného materiálu a následný požiar.

Hustota tepelného toku prenášaného tepelnou konvekciou z tekutiny (vzduchu) do tuhej látky sa počíta podľa rovnice [2.22] a z tuhej látky do tekutiny podľa rovnice [2.23].

$$q_c = h \cdot (t_a - t_h) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad [2.22]$$

q_c : hustota tepelného toku prenášaného tepelnou konvekciou ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

h : koeficient prestupu tepla z tekutiny do tuhej látky ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

t_a : teplota tekutiny (vzduchu) prúdiacej okolo tuhej látky ($^{\circ}\text{C}$)

t_h : teplota povrchu tuhej látky ($^{\circ}\text{C}$)

$$q_c = h \cdot (t_h - t_a) \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}) \quad [2.23]$$

Celkový tepelný tok prenášaný konvekciou sa počíta podľa rovnice [2.24].

$$Q_c = q_c \cdot A \quad (\text{W}) \quad [2.24]$$

Q_c : celkový tepelný tok prenášaný konvekciou (W)

A : plocha tuhej látky (m^2)

Najkomplikovanejším problémom pri výpočte prenosu tepla konvekciou je určenie koeficienta prestupu tepla. Uvedený výpočet je založený na použití tzv. kritériálnych rovníc vychádzajúcich z teórie podobnosti. Pri iniciácii a rozvoji požiaru má vo väčšine prípadov rozhodujúci význam voľná konvekcia do neobmedzeného priestoru, preto bude v nasledovnej časti venovaná pozornosť práve tomuto typu konvekcie.

Koeficient prestupu tepla pri voľnej konvekcii do neobmedzeného priestoru sa vypočíta na základe rovnice [2.25] (Taraba a kol. 2007).

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Ra}^n \quad (-) \quad [2.25]$$

Nu : Nusseltovo číslo (-)

C : konštanta (-)

Ra : Rayleighovo číslo (-)

n : konštanta (-)

Hodnota konštanty C sa určí z tabuľky 2-4 podľa Rayleighovho čísla. Pred výpočtom Rayleighovho čísla sa vypočíta tzv. charakteristická stredná teplota t_{ch} ($^{\circ}\text{C}$) podľa rovnice [2.26]. Rayleighovho číslo sa počíta podľa rovnice [2.27] (Taraba a kol. 2007).

$$t_{ch} = \frac{t_a + t_h}{2} \quad (^{\circ}\text{C}) \quad [2.26]$$

t_{ch} : charakteristická stredná teplota ($^{\circ}\text{C}$)

$$\text{Ra} = \frac{g \cdot L^3 \cdot a_v \cdot \Delta t}{a \cdot \nu} \quad (-) \quad [2.27]$$

g : koeficient tiažového zrýchlenia na povrchu Zeme: $9,81 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-2}\text{)}$

L : charakteristický rozmer (m)

a_v : koeficient objemovej rozťažnosti vzduchu, resp. teplotnosného média (počíta sa podľa rovnice [2.28]) (m^{-1})

Δt : rozdiel teplôt medzi teplotnosným médiom a ohrievaným materiálom ($^{\circ}\text{C}$)

a : koeficient teplotnej vodivosti vzduchu, resp. teplotnosného média (hodnoty pre vzduch sú uvedené v prílohe D) ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

ν : kinematická viskozita vzduchu, resp. teplotnosného média (hodnoty pre vzduch sú uvedené v prílohe D) ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

Tabuľka 2-4 Hodnoty konštánt C a n pre kritériálnu rovnicu

Ra (-)	C (-)	n (-)
0 až 10^{-3}	0,45	0
10^{-3} až ∞	1,18	1,8
500 až $2 \cdot 10^7$	0,54	1,4
$2 \cdot 10^7$ až ∞ ¹³	0,135	1,3

Prameň: Taraba a kol. (2007)

$$a_v = \frac{1}{t_{ch} + 273,15} \quad (\text{m}^{-1}) \quad [2.28]$$

Po vypočítaní Nusseltovho čísla sa vypočíta koeficient prestupu tepla podľa rovnice [2.29].

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{L} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad [2.29]$$

λ : koeficient tepelnej vodivosti vzduchu, resp. teplotnosného média (hodnoty pre vzduch sú uvedené v prílohe D) ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Po výpočte koeficienta prestupu tepla je potrebné tento korigovať v závislosti od vzájomnej orientácie smeru prúdenia tekutiny a ohrievaného (prípadne ochladzovaného) povrchu. Ak teplo-výmenné médium prúdi zo spodnej strany na povrchu ohrievaného (ochladzovaného) materiálu je potrebné zvýšiť vypočítaný koeficient prestupu tepla o 30%. Ak teplo-výmenné médium prúdi na ohrievaný (ochladzovaný) povrch z jeho vrchnej strany, je potrebné vypočítaný koeficient prestupu tepla o 30% znížiť.

Ak sa rovinná stena nachádza medzi dvomi prostrediami s rôznou teplotou plynov (napr. stena medzi interiérom a exteriérom v zimnom alebo letnom období alebo stena medzi požiarovými úsekmi z ktorých jeden je zasiahnutý požiarom) dochádza k prechodu tepla s hustotou tepelného toku q_t ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), ktorý sa počíta podľa rovnice [2.30]. Pri takomto prechode sa uplatňuje tzv. kombinovaný prenos tepla, kedy teplo zo vzduchu teplejšieho ako povrch steny prestupuje do steny. Vo vnútri steny je teplo prenášané vedením smerom od teplejšej strany k chladnejšej a následne prestupuje z povrchu chladnejšej strany do vzduchu.

$$q_k = \frac{t_i - t_e}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_e}} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad [2.30]$$

q_t : hustota tepelného toku prenášaného rovinnou stenou situovanou medzi plynným prostredím s teplotami t_i a t_e ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

t_i : teplota teplejšieho plynného prostredia (napr. v zimnom období teplota vykurovaného interiéru alebo počas požiaru teplota plynov v požiarovom úseku) ($^{\circ}\text{C}$)

t_e : teplota chladnejšieho plynného prostredia (napr. v zimnom období teplota vzduchu v exteriéri alebo počas požiaru teplota vzduchu na neohrievanej strane steny) ($^{\circ}\text{C}$)

h_i : koeficient prestupu tepla z plynného prostredia do steny ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

h_e : koeficient prestupu tepla zo steny do plynného prostredia ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

2.1.3.

Prenos tepla žiarením a žiarenie plameňa

Tepelné žiarenie (tepelná radiácia, sálanie) je prenos energie v podobe elektromagnetického žiarenia. Elektromagnetické žiarenie sa podľa vlnovej dĺžky rozdeľuje do niekoľkých oblastí. V prípade tepelného žiarenia sa jedná o oblasť elektromagnetického žiarenia s vlnovou dĺžkou 760 až 4000 nm. Táto oblasť sa označuje aj ako infračervené alebo tepelné žiarenie. Elektromagnetické žiarenie vyžaruje zo svojho povrch každé reálne teleso s teplotou vyššou ako absolútna nula. Elektromagnetické žiarenie sa v priestore (vo vákuu) šíri rýchlosťou svetla ($2\,999\,792\,45,8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (Bahýl a Igaz 2010).

Z celkového elektromagnetického žiarenia, ktoré dopadne na povrch telesa sa časť žiarenia pohltí, časť odrazí a časť telesom prejde. Z Kirchhoffovho zákona vyplýva, že súčet pohlteneho, odrazeného a prejdeného tepelného toku sa rovná celkovému tepelnému toku dopadnutému na povrch telesa (Taraba a kol. 2007).

Hustota tepelného toku vyžarovaného z povrchu tuhého telesa sa počíta podľa Stefan-Boltzmannovho zákona [2.31].

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}) \quad [2.31]$$

q_r : hustota tepelného toku vyžarovaného z povrchu tuhého telesa ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

ε : emisivita povrchu materiálu (-)

σ : Stephan-Boltzmannova konštanta $5,67\cdot 10^{-8}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)

T : termodynamická teplota na povrchu materiálu (K)

Zo Stefan-Boltzmannovho zákona vyplýva, že hustota tepelného toku vyžarovaného z povrchu tuhého telesa je úmerná emisivite povrchu materiálu a štvrtjej mocnine termodynamickej teploty.

Emisivita povrchu materiálov nadobúda hodnoty v intervale od 0 (absolútne biele teleso) až po 1 (absolútne čierne teleso). Absolútne biele aj absolútne čierne teleso sú fyzikálne modely hypotetických, reálne neexistujúcich telies. Absolútne biele teleso by odrážalo elektromagnetické žiarenie všetkých vlnových dĺžok a naopak, zo svojho povrchu by nevyžarovalo žiadne elektromagnetické žiarenie. Absolútne čierne teleso by naopak pohlcovalo elektromagnetické žiarenie všetkých vlnových dĺžok a súčasne vyžarovalo elektromagnetické žiarenie s najväčšou hustotou (pri danej teplote). Reálne telesá (označované ako sivé) nadobúdajú emisivitu v intervale (0 až 1). Emisivita povrchu tuhých telies nemôže byť stotožnená s ich farbou. Aj keď na druhej strane vo všeobecnosti platí, že materiály s drsným a zoxidovaným povrchom vykazujú vyššiu hodnotu emisivity ako tie isté materiály s hladkým povrchom. Nemožnosť zameňovania emisivity povrchu materiálu s jeho farbou, tak ako ju vníma ľudské oko vyplývajú z tabuľky 2-5, podľa ktorej papier vykazuje emisivitu v intervale od 0,8 do 0,9 (pričom papier vykazuje zvyčajne farbu od bielej po žltú) a voda v intervale 0,95 až 0,96. Pri výpočtoch v technickej praxi sa uvažuje s emisivitou povrchu slnka 1 (teda slnko môžeme považovať za absolútne čierne teleso). Emisivita povrchu ľudského tela je približne 0,98. Emisivita povrchov vybraných tuhých telies je uvedená v tabuľke 2-5.

Tabuľka 2-5 Emisivita povrchov vybraných materiálov

Materiál a druh povrchu (-)	Teplota (°C)	Emisivita (-)
Drevo s hobľovaným povrchom	20	0,8 – 0,9
Hliník s drsným povrchom	26	0,055
Hliník s lešteným povrchom	225 – 575	0,039 – 0,057
Oceľ s oxidovaným drsným povrchom	40 – 370	0,94 – 0,97
Oceľová liatina s lešteným povrchom	770 – 1040	0,52 – 0,57
Papier	20	0,8 – 0,9
Pozinkovaný plech	24	0,276
Sadra	20	0,8 – 0,9
Sklo s hladkým povrchom	22	0,94
Striebro s lešteným povrchom	38 – 370	0,0221 – 0,0312
Tehla pálená drsná	20	0,93
Voda	0 – 100	0,95 – 0,96
Železo s čerstvo obrúseným povrchom	20	0,242
Železo s lešteným povrchom	425 – 1020	0,144 – 0,377
Železo s oxidovaným hladkým povrchom	125 – 525	0,78 – 0,82

Prameň: Setnička (1981)

Ako vyplýva z tabuľky 2-5 emisivita povrchu nie je materiálová konštanta, ale významným spôsobom závisí od fyzikálneho stavu povrchu (leštený, brúsený, zoxidovaný a pod.). Ďalším významným faktorom vplývajúcim na emisivitu povrchu je jeho teplota, pričom vo všeobecnosti platí, že s narastajúcou teplotou sa emisivita zvyšuje (tento záver však nemusí platiť po fázovej alebo skupenskej zmene).

Rovnica [2.31] umožňuje výpočet hustoty vyžarovaného tepelného toku, ale neumožňuje vypočítať vlnovú dĺžku elektromagnetického žiarenia. Povrch telesa vyžaruje elektromagnetické žiarenie s rôznymi vlnovými dĺžkami, pričom vlnová dĺžka na ktorej je intenzita vyžarovania maximálna sa počíta podľa Wienovho posuvného zákona [2.32]. Wienov posuvný zákon dokazuje, že vlnová dĺžka pri ktorej je intenzita vyžarovania maximálna, závisí len od termodynamickkej teploty povrchu (nie od jeho chemického zloženia ani fyzikálnych vlastností).

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (\text{mm}) \quad [2.32]$$

λ_{\max} : vlnová dĺžka pri ktorej je (pri teplote T) intenzita vyžarovania maximálna (mm)

b : univerzálna konštanta 2,898 (mm.K)

T : termodynamická teplota na povrchu materiálu (K)

Podľa Zeleného a Slosiarika (2000) sa maximálna teplota vnútorných požiarov (za predpokladu, že dominantná časť požiarneho zaťaženia je tvorená tuhými horľavými látkami) pohybuje v rozmedzí 1100 až 1150 °C. Z Wienovho posuvného zákona teda vyplýva, že elektromagnetické žiarenie za podmienok vnútorných požiarov bude mať lokálne maximum na vlnovej dĺžke $2,036 \cdot 10^{-6}$ až $2,11 \cdot 10^{-6}$ m, čo je infračervená oblasť elektromagnetického spektra. Povrch materiálu zahriaty na uvedené maximálne teploty vnútorného požiaru bude (za predpokladu, že sa správa ako absolútne čierne teleso)

vyžarovať tepelné žiarenie s hustotou tepelného toku 201 až 232,5 kW.m⁻². Podľa NFPA 921:2014 je maximálna hustota tepelného toku, ktorá bola zmeraná počas plne rozvinutého požiaru 170 kW.m⁻². Príčinou tohto rozdielu je skutočnosť, že maximálna teplota počas požiaru je daná teplotou plynov v požiarom úseku (a nie teplotu ohraničujúcich konštrukcií), ale na výslednej hustote tepelného toku sa zásadným spôsobom podieľa vyžarovanie práve ohraničujúcich konštrukcií.

Celkový tepelný tok dopadajúci na povrch materiálu nezávisí len od teploty, plochy a emisivity zdroja elektromagnetického žiarenia, ale aj od emisivity a plochy povrchu ohrievaného materiálu a od vzájomnej vzdialenosti a orientácie ohrievaného povrchu a zdroja žiarenia. Celkový tepelný tok prenášaný medzi dvomi povrchmi, s rôznou teplotou, všeobecne situovanými v priestore sa počíta podľa rovnice [2.33], ktorú bližšie popisujú napr. Modest (2013) a Taraba a kol. (2007).

$$Q_r = \varphi_{12} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W}) \quad [2.33]$$

Q_r : celkový tepelný tok prenášaný radiáciou z teplejšieho povrchu na povrch chladnejší (W)

φ_{12} : uhlový koeficient ožiarenia (-)

ε_1 : emisivita teplejšieho povrchu (-)

ε_2 : emisivita chladnejšieho povrchu (-)

A_1 : referenčná plocha (plocha chladnejšieho, resp. ohrievaného telesa) (m²)

T_1 : termodynamická teplota teplejšieho povrchu (K)

T_2 : termodynamická teplota chladnejšieho (ohrievaného) povrchu (K)

Rozdiel teplôt ($T_1 - T_2$) v rovnici [2.33] započítava do výsledného tepelného toku skutočnosť, že k prenosu tepla žiarením nedochádza len z teplejšieho telesa na chladnejšie, ale aj z chladnejšieho telesa na teplejšie teleso. S ohľadom na skutočnosť, že termodynamické teploty sú v rovnici [2.33] umocnené na 4, je možné pri veľkom rozdiel teplôt hustotu tepelného toku z chladnejšieho telesa na teplejšie zanedbať. Pri relatívne vysokých teplotách ohrievaného telesa (rádovo stovky °C) však už daný vplyv zanedbaný byť nemôže (resp. jeho zanedbanie by viedlo k významnému skresleniu získaných údajov).

Uhlový koeficient ožiarenia, vyjadrujúci vplyv vzájomného usporiadania (geometrie) teplejšieho a chladnejšieho povrchu sa počíta podľa rovnice [2.34], ktorú bližšie popisujú napr. Modest (2013) alebo Kadlec (2009).

$$\varphi_{12} = \frac{1}{A_1} \cdot \int_{A_1} \left(\int_{A_2} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi \cdot r^2} dA_2 \right) dA_1 \quad (-) \quad [2.34]$$

A_1 : plocha teplejšieho telesa (tepelného žiariča) (m²)

A_2 : plocha chladnejšieho (ohrievaného) telesa (m²)

φ_1 : uhol, ktorý zvierajú spojnice stredov plôch A_1 a A_2 a normála plochy A_1 (°)

φ_2 : uhol, ktorý zvierajú spojnice stredov plôch A_1 a A_2 a normála plochy A_2 (°)

r : vzdialenosť medzi stredom plôch A_1 a A_2 (m)

Výpočet uhlového koeficienta ožiarenia podľa rovnice [2.34] je však v praxi mimoriadne komplikovaný a analytickým postupom prakticky nevypočítateľný. Polohový faktor sa preto v praxi často počíta za predpokladu určitého zjednodušenia alebo pre určité tvary telies a ich vzájomné konfigurácie je možné jeho hodnotu nájsť v špecializovanej

literatúre (napr. Howel a kol 2010). Najčastejšie používaným zjednodušením je predpoklad výmeny tepla medzi dvomi nekonečne dlhými, rovnobežnými stenami alebo výmeny tepla v uzatvorenej sústave. Predpoklad výmeny tepla medzi dvomi nekonečne dlhými, rovnobežnými stenami je podľa Kadleca (2009) splnený napr. pri výmene tepla medzi zadnou stranou pece a rovnou stenou (za predpokladu, že sú dostatočne blízko seba). Ako príklad prenosu tepla medzi dvomi telesami v uzatvorenej sústave uvádza citovaný autor výmenu tepla medzi vykurovacím potrubím a stenami miestnosti. Rovnako za príklad prenosu tepla v uzatvorenej sústave môže byť považovaná aj výmena tepla medzi lokálnym požiarom a stenami miestnosti (do času pokiaľ nedôjde k otvoreniu uzáverov otvorov v ohraničujúcich konštrukciách).

Celkový tepelný tok medzi dvomi nekonečne dlhými, rovnobežnými stenami sa počíta podľa rovnice [2.35].

$$Q_r = A_1 \cdot \varepsilon_{12} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W}) \quad [2.35]$$

ε_{12} : je výsledná emisivita, ktorá sa počíta podľa rovnice [2.36] (-)

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (-) \quad [2.36]$$

V uzatvorených sústavách (prípady, keď teleso s plochou A_2 úplne obklopuje teleso s plochou A_1) sa celkový tepelný tok medzi týmito telesami počíta tak isto ako pri nekonečne dlhých, rovnobežných stenách podľa rovnice [2.35]. Rozdiel je len v určení výslednej emisivity, ktorá sa určí podľa rovnice [2.36]. Rovnice [2.34 až 2.37] uvádzajú a podrobne popisujú napr. (Modest 2013, Taraba a kol. 2007 a Kadlec 2009).

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (-) \quad [2.37]$$

Pri výmene tepla žiarením medzi dvomi rovnobežnými plochami je možné polohový faktor vypočítať podľa rovnice [2.38], ktorú uvádza a bližšie popisujú napr. Balog a Kvarčák (1999), Blahož a Kadlec (2000) a Kučera a kol. (2008).

$$\varphi_i = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{a}{(1+a^2)^{1/2}} \cdot \arctan \left(\frac{b}{(1+a^2)^{1/2}} \right) + \frac{b}{(1+b^2)^{1/2}} \cdot \arctan \left(\frac{a}{(1+b^2)^{1/2}} \right) \right] \quad (-) \quad [2.38]$$

φ_i : čiastkový polohový faktor (-)

a : výška žiariaceho povrchu (m) / vzdialenosť medzi stredmi žiariaceho a ohrievaného povrchu (m) (-)

b : šírka žiariaceho povrchu (m) / vzdialenosť medzi stredmi žiariaceho a ohrievaného povrchu (m) (-)

V rovnici [2.38] sa uvažuje s tzv. čiastkovým polohovým faktorom, nakoľko pri takomto postupe výpočtu sa plocha vyžarovacieho povrchu rozdeľuje spravidla na štyri časti a polohový faktor sa počíta pre každú z nich ako čiastkový polohový faktor. Výsledný polohový faktor je daný sumou čiastkových polohových faktorov.

V požiarnej inžinierstve a zisťovaní príčin vzniku požiarov sa vo väčšine prípadov neuvažuje so samotným tepelným žiarením plameňa, ale namiesto toho sa uvažuje s tým, že požiar (plameň alebo splodiny horenia) ohreje tuhé telesá (napr. stavebné konštrukcie a zariadenie predmety) a tieto následne vyžarujú zo svojho povrchu tepelné žiarenie s hustotou úmernou ich emisivite a štvrtjej mocnине termodynamickéj teploty. Prípadne sa

uvažuje priamo s rýchlosťou uvoľňovania tepla z požiaru (plameňa). Samotné žiarenia plameňa sa hlavne kvôli značnej komplikovanosti tohto problému v požiarom inžinierstve zvyčajne nerieši. V oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov však môže nájsť uplatnenie aj tento údaj, preto bude v tejto podkapitole venovaná danej problematike bližšia pozornosť. Hustota tepelného toku vyžarovaného z plameňa závisí (podobne ako hustota tepelného toku vyžarovaného z povrchu tuhých telies) od jeho teploty a emisivity. Napriek tom existujú medzi žiarením povrchu tuhých telies a žiarením plameňa významné rozdiely.

2.1.3.1.

Teoretická teplota plameňa

Pred podrobným rozborom problematiky termodynamickej teploty a vyžarovania plameňa je ho potrebné najskôr definovať. Plameň je možné definovať ako vzostupný prúd horúcich plynov (chemické zloženie plynov je v závislosti od miesta v plameni veľmi variabilné – od čistej horľaviny, resp. u tuhých materiálov plynných produktov termického rozkladu až po CO_2 a H_2O) a rozptýlených jemných častíc s vysokým obsahom uhlíka (sadzí). Podľa obsahu sadzí sa plameň delí na **nesvietivý** (počas horenia nevznikajú sadze, nesvietivý plameň je typický svojím modrým sfarbením), **svietivý** (počas horenia vznikajú sadze emitujúce žlté svetlo) a **čadivý** (počas horenia vzniká viac sadzí ako pri svietivom plameni, výsledkom je tmavšia žltá farba ako v prípade svietivého plameňa). Podľa Drysdala (1999) horia nesvietivým plameňom napr. vodík a metanol. Podľa citovaného autora dochádza k prenosu tepla z nesvietivého plameňa radiáciou len na úrovni pod 10% z výhrevnosti paliva. Svietivým plameňom horí väčšina bežných palív (svietivosť plameňa závisí od ekvivalentného pomeru medzi palivom a oxidačným prostriedkom – preto relatívne veľké množstvo bežných horľavých materiálov môže v závislosti od vonkajších podmienok horieť svietivým aj čadivým plameňom). Typickým príkladom svietivého plameňa je sviečka. Podľa Drysdala (1999) pri požiaroch bežných palív s priemerom nad 0,3 m (za uvedených podmienok sú splnené podmienky na horenie svietivým plameňom) dochádza k prenosu tepla z plameňa radiáciou na úrovni 30 až 50% z výhrevnosti paliva. Vysoká hodnota tepelnej radiácie zo svietivého plameňa významným spôsobom znižuje presnosť ďalej popísaného postupu výpočtu teoretickej teploty plameňa (pri svietivom plameni jednak nie je splnený predpoklad úplne dokonalého horenia a na druhej strane dochádza k jeho výraznému ochladzovaniu teplom vyžiareným tepelnou radiáciou zo sadzí). Čadivý plameň je sprievodným javom výrazne nedokonalého horenia (pri výpočte teoretickej teploty plameňa teda nie je splnená podmienka dokonalého horenia a ďalej uvedený postup nie je vhodný na výpočet teoretickej teploty čadivého plameňa).

Pred výpočtom hustoty tepelného toku vyžarovaného z plameňa je potrebné vypočítať jeho teplotu, ktorá sa označuje ako teoretická alebo adiabatická teplota.

Teoretická teplota plameňa je maximálna teplota plameňa, ktorú môže tento dosiahnuť za predpokladu, že horenie prebieha ako adiabatický dej, dokonalým spôsobom a pri ekvivalentnom pomere medzi palivom a oxidačným prostriedkom rovným jednej. Ďalším dôležitým, aj keď v požiarom inžinierstve často zanedbávaným, predpokladom je, že nedochádza k disociácii spalín a stratám tepla tepelnou radiáciou.

Teoretická teplota plameňa sa za predpokladu, že všetko uvoľnené teplo sa spotrebuje na ohrev produktov horenia počíta podľa rovnice [2.39].

$$Q_v = \sum_{i=1}^n [n_i \cdot c_{pi}] \cdot (T_{TP} - T_a) \quad (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}) \quad [2.39]$$

Q_v : výhrevnosť paliva ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$)

n_i : látkové množstvo i -tej zložky spalín (mol)

c_{pi} : izobarická mólová tepelná kapacita i -tej zložky spalín ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$)

T_a : teplota okolia (K) – štandardne sa uvažuje s hodnotou 298 K

T_{TP} : teoretická teplota plameňa (K)

Pri dokonalom horení organických materiálov, ktoré pozostávajú z uhlíka, vodíka, prípadne kyslíka, pričom môžu v malom množstve obsahovať aj iné prvky, napr. dusík, síru alebo halogénové prvky (túto požiadavku spĺňa väčšina organických materiálov, napr. polyetylén, polypropylén, polystyrén, polyuretán, lignocelulózoové materiály a pod.) sa ako zložkami spodín horenia pri výpočte podľa rovnice [2.39] uvažuje s oxidom uhličitým, vodou a dusikom. S kyslíkom a oxidom uhoľnatým sa neuvažuje, nakoľko základný predpoklad výpočtu teoretickej teploty plameňa je dokonalé horenie pri ekvivalentnom pomere rovnom jednej.

Výpočet teoretickej teploty plameňa komplikuje významná závislosť špecifickej tepelnej kapacity (v teplotnom rozsahu od teploty okolia do teoretickej teploty plameňa) spalín od teploty. Následkom uvedenej závislosti nie je možné do rovnice [2.39] dosadiť tabuľkovú hodnotu špecifickej tepelnej kapacity zložiek spalín (CO_2 , H_2O a N_2) platnú pre teplotu 20 °C, ale je potrebné dosadiť priemernú hodnotu integrovanej špecifickej tepelnej kapacity od teploty okolia až po teoretickú teplotu plameňa. Pre ilustráciu nepresnosti vzniknutej dosadením špecifickej tepelnej kapacity zložiek spalín pri teplote 20 °C [do rovnice 2.39], namiesto jej priemernej integrovanej hodnoty (od teploty okolia až po teoretickú teplotu plameňa), je na obr. 2-3 znázornená závislosť špecifických tepelných kapacít oxidu uhličitého, vody a dusíka od teploty.

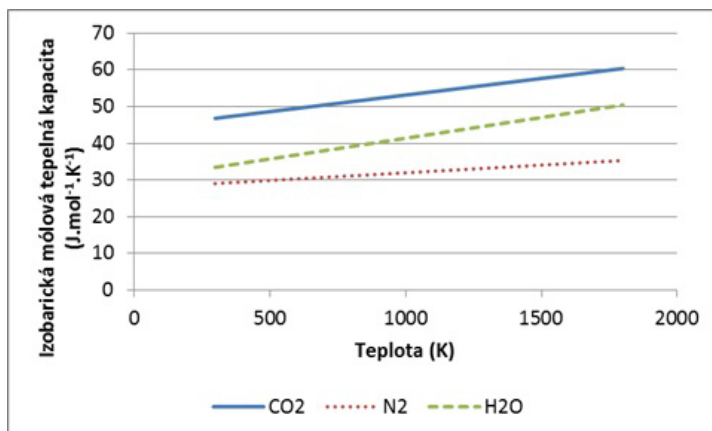
Špecifická tepelná kapacita látky pri určitej teplote sa počíta podľa rovnice [2.40], ktorú uvádzajú napr. Vohlídal a kol. (1999).

$$c_p^T = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^{-2} \quad (\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}) \quad [2.40]$$

c_p^T : špecifická tepelná kapacita pri konštantnom tlaku a teplote T ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

A, B, C, D : konštanty pre konkrétnu látku ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$, $\text{J}\cdot\text{K}^{-2}\cdot\text{mol}^{-1}$, $\text{J}\cdot\text{K}^{-3}\cdot\text{mol}^{-1}$, $\text{J}\cdot\text{K}\cdot\text{mol}^{-1}$)

Hodnoty konštant A, B, C a D pre vybrané plynné látky sú uvedené v tabuľke 2-6.



Obrázok 2-3 Závislosť izobarickej mólovej tepelnej kapacity oxidu uhličitého, dusíka a vodnej pary od teploty (vypočítané na základe rovníc a údajov publikovaných Vohlídalom a kol. 1999)

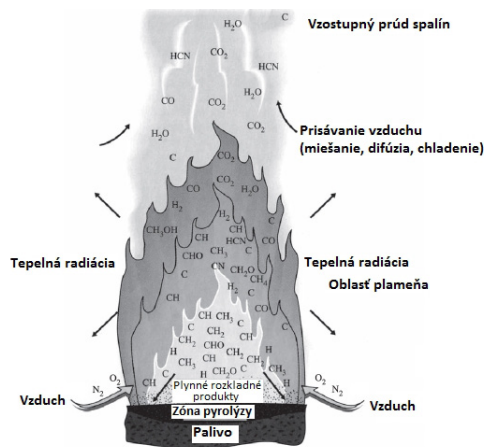
Tabuľka 2-6 Koefficienty pre výpočet teplotnej závislosti špecifických tepelných kapacít vybraných látok

Látka	A J.K ⁻¹ .mol ⁻¹	B J.K ⁻² .mol ⁻¹	C J.K ⁻³ .mol ⁻¹	D J.K.mol ⁻¹	Rozmedzie teplôt (K)
Al(s)	20,67	0,01238	–	–	298–932
CO(g)	28,41	0,0041	–	–0,0000046	298–2500
CO ₂ (g)	44,14	0,00904	–	–0,0000854	298–2500
H ₂ O(g)	30,12	0,0113	–	–	298–2000
H ₂ O(l)	75,383	–	–	–	298–373
N ₂ (g)	27,82	0,00418	–	–	298–2500
NO(g)	29,41	0,00385	–	–0,0000059	298–2500
NO ₂ (g)	42,93	0,00854	–	–0,0000674	298–2000
O ₂ (g)	36,162	0,000845	–	–0,0000431	298–1500
O ₃ (g)	41,25	0,01029	–	0,0000552	298–2000
Acetón(g)	22,472	0,201782	–0,000063521	–	298–1500
Benzén(g)	–21,087	0,400116	–0,00016987	–	298–1000
Etanol (g)	14,97	0,20859	0,00007109	–	298–1000
Etanol (l)	125	–	–	–	298–351
Metanol (g)	20,42	0,10368	–0,00002464	–	298–1000
Metanol (l)	86,6	–	–	–	298–320

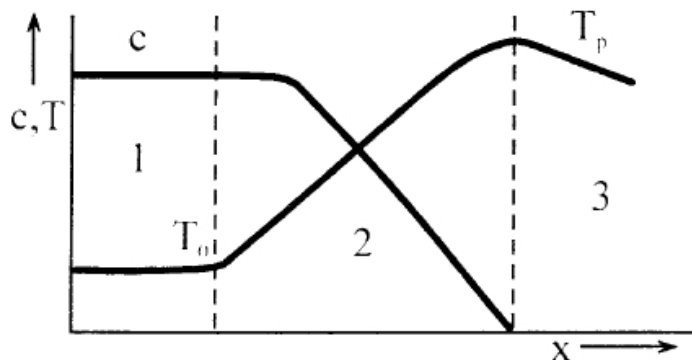
Prameň: Vohlídal a kol. (1999)

2.1.3.2. Žiarenie plameňa

Presnejšie znenie definície plameňa z predchádzajúcej podkapitoly bo bolo, že plameň je nehomogénna zmes vzostupného prúdu horúcich plynov, ktoré môžu obsahovať značne variabilné množstvo jemne rozptýlených častíc s vysokým obsahom uhlíka. Nehomogenitu plameňa ilustrujú obr. 2-4 a 2-5.



Obrázok 2-4 Ilustračné rozloženie chemických látok v plameni (Bell 2006)



T : teplota, c : koncentrácia plynného paliva, T_0 : počiatočná teplota paliva, T_p : teplota plameňa, x : výška plameňa, 1: plynné palivo, 2: reakčné pásmo, 3: spaliny.

Obrázok 2-5 Rozloženie teploty a koncentrácie plynných rozkladných produktov v plameni (Balog a Kvarčák 1999)

Jednoatómové a väčšinu dvojátomových plynov môžeme považovať za dokonale priepustné. So žiarením uvažujeme len v prípade viacatómových plynov. V prípade spalín majú schopnosť vyžarovať predovšetkým oxid uhličitý a voda. Žiarenie plynov v porovnaní s pevnými telesami vykazuje nasledovné rozdiely (Blahož a Kadlec 2000, Kadlec 2009):

- má výrazne selektívny charakter (plyny vyžarujú a pohlcujú energiu len v určitých intervaloch vlnových dĺžok),
- vyžarovanie aj pohlcovanie sa uskutočňuje v celom objeme.

Intenzita vyžarovania plynov dokonca nie je úmerná štvrtej mocnine termodynamической teploty. Kvôli zjednodušeniu výpočtu sa však uvažuje s úmernosťou intenzity vyžarovania plynov od štvrtej mocniny termodynamической teploty a používa upravený Stefan-Boltzmanov zákon. Pre intenzitu vyžarovania plynného telesa do dokonale čierneho priestoru s teplotou 0 K platí rovnica [2.41] (Blahož a Kadlec 2000, Kadlec 2009).

$$E_p = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot T_p^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad [2.41]$$

E_p : Intenzita vyžarovania plynu do dokonale čierneho priestoru s teplotou 0 K ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

ε_p : emisivita plynu (-)

T_p : termodynamická teplota plynu (K)

Emisivita plynu závisí od jeho parciálneho tlaku a účinnej hrúbky vrstvy (Blahož a Kadlec 2000, Kadlec 2009).

Spektrum žiarenia svietivého plameňa je oveľa rovnomernejšie ako selektívne spektrum plynov a svoju podstatou sa viac blíži k žiareniu pevných telies ako plynov (Kadlec 2009). Príčinou je skutočnosť, že na žiarení zo svietivého plameňa majú rozhodujúci podiel tuhé častice s vysokým obsahom uhlíka (sadze), teda tuhé látky. Experimentálne určenie emisivity plameňa je komplikované, nakoľko táto sa mení s hrúbkou vrstvy a hlavne s výškou. Predstavu o emisivite plameňa je možné získať z údajov v tabuľke 2-7. Rovnako problematické je určovanie strednej teploty plameňa. Orientačné hodnoty sú uvedené v tabuľke 2-8 (Balog a Kvarčák 1999, Blahož a Kadlec 2000, Kadlec 2009). Hodnoty stredných teplôt plameňa v tabuľke 2-8 sú podstatne nižšie, ako teoretické teploty plameňa uvedených horľavých látok. Príčinou je jednak fakt, že za reálnych podmienok horenie neprebícha pri ekvivalentom pomere rovnom jednej a dochádza k disociácii

spalín. Okrem toho aj keby horenie prebiehalo pri ekvivalentnom pomere rovnom jednej, maximálna teplota by bola dosiahnutá len v pomerne úzkej vrstve na špičke plameňa (obr. 2-5). Priemerná hodnota teploty celého plameňa by však približne zodpovedala hodnotám v tabuľke 2-8.

Tabuľka 2-7 Emisivita vybraných druhov plameňa

Druh plameňa	Emisivita (-)
Nesvietivý plameň prúdu plynov	0,3
Svietivý plameň antracitového prachu	0,45
Svietivý plameň uhlia bohatého na prchavé látky, dreva a rašeliny	0,7
Svietiaci plameň mazutu	0,85
Svietiaci plameň benzínu	0,96 až 0,99

Prameň: Balog a Kvarčák (1999) a Kadlec (2009)

Tabuľka 2-8 Stredné teploty plameňa vybraných látok

Horľavá látka	Stredná teplota plameňa (°C)
Rašelina, mazut	1000
Drevo, hnedé uhlie, ropa, petrolej, nafta	1100
Čierne uhlie, kaučukové výrobky, benzín	1200
Horľavé plyny	1300 – 1500
Horčík, elektrón	2000

Prameň: Blahož a Kadlec (2000) a Kadlec (2009)

Teoretické teploty plameňa vybraných látok pri dolnej medze horľavosti ilustruje tabuľka 2-9.

Tabuľka 2-9 Teoretické teploty plameň vybraných látok horiacich pri dolnej medze horľavosti

Látka	Teoretická teplota plameňa (K)
Metán	1446
Etán	1502
Propán	1554
<i>n</i> -Bután	1612
<i>n</i> -Pentán	1564
<i>n</i> -Heptán	1692
<i>n</i> -Oktán	1632

Prameň: Drysdale (2002)

Hustota tepelného toku prenášaného tepelnou radiáciou zo svietivého plameňa na povrch stien sa počíta podľa rovnice [2-42] (Kadlec 2009).

$$q_{PS} = \varepsilon_{SP} \cdot \varepsilon_S \cdot \sigma \cdot (T_P^4 - T_S^4) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad [2.42]$$

q_{PS} : hustota tepelného toku zo svietivého plameňa do stien ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

ε_{SP} : emisivita svietivého plameňa (-)

ε_S : emisivita povrchu stien (-)

T_S : termodynamická teplota povrchu stien (K)

Hustota tepelného toku prenášaného z nesvietivého plameňa na povrch stien sa počíta podľa rovnice [2-43] (Kadlec 2009).

$$q_{NPS} = \varepsilon'_S \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_P \cdot T_P^4 - A_P \cdot T_S^4) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad [2.43]$$

q_{NPS} : hustota tepelného toku z nesvietivého plameňa do stien ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

ε'_S : emisivita povrchu stien pri výmene tepla radiáciou s nesvietivým plameňom (-)

A_P : koeficient absorpcie (-)

Ak emisivita povrchu stien (ε_S) leží v intervale od 0,8 do 1 (túto podmienky spĺňajú prakticky všetky steny v stavbách), tak hodnota emisivity povrchu stien pri výmene tepla radiáciou s nesvietivým plameňom ε'_S sa počíta podľa rovnice [2.44] (Kadlec 2009).

$$\varepsilon'_S = 0,5 \cdot (\varepsilon_S + 1) \quad (-) \quad [2.44]$$

Emisivita plynu s obsahom oxidu uhličitého a vodnej pary sa počíta podľa rovnice [2.45] (Kadlec 2009).

$$\varepsilon_P = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta\varepsilon \quad (-) \quad [2.45]$$

$\varepsilon_{\text{CO}_2}$: emisivita oxidu uhličitého (-)

β : korekčný koeficient (-)

$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$: emisivita vodnej pary (-)

$\Delta\varepsilon$: korekcia vzájomného prekrytia spektier CO_2 a H_2O (štandardne sa zanedbáva) (-)

Korekčný koeficient β sa určuje v závislosti od parciálneho tlaku vodnej pary a súčiny parciálneho tlaku vodnej pary a účinnej hrúbky jej vrstvy z grafu v prílohe E. Emisivita oxidu uhličitého a vodnej pary sa určuje v závislosti od teploty a súčiny parciálneho tlaku (CO_2 alebo H_2O) a účinnej hrúbky ich vrstiev z grafov v prílohe F a G.

Absorpčný koeficient sa počíta podľa rovnice [2.46] (Kadlec 2009).

$$A_P = \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot \left(\frac{T_P}{T_S}\right)^{0,65} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot \left(\frac{T_P}{T_S}\right)^n \quad (-) \quad [2.46]$$

Koeficient β sa odčíta z grafu v prílohe E a koeficienty $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ a $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ z grafov v prílohách F a G pre teplotu steny. Hodnota koeficienta n rovnako závisí od teploty steny. Pri teplote steny do 500°C sa uvažuje s hodnotou 0,5, pri teplote v intervale od 500 do 900°C je hodnota koeficienta n 0,45 a ak je teplota steny nad 900°C dosadzuje sa za n hodnota 0,4. Účinná hrúbka vrstvy žiariaceho plynu sa počíta podľa rovnice [2.47] (Blahož a Kadlec 2000 a Kadlec 2000).

$$l = 3,6 \cdot \frac{V}{A}, \text{ ak platí } l > 1\text{m}, 3,4 \cdot \frac{V}{A}, \text{ ak platí } l \leq 1\text{m} \quad (\text{m}) \quad [2.47]$$

l : účinná hrúbka vrstvy žiariaceho plynu (m)

V : objem priestoru v ktorom sa žiariaci plyn nachádza (m^3)

S : celkový povrch ohraničujúcich konštrukcií priestoru v ktorom sa žiariaci plyn nachádza (m^2)

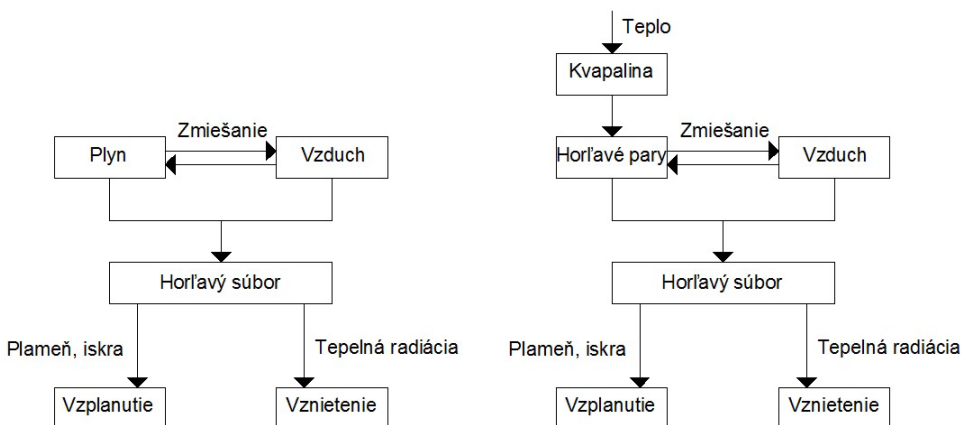
2.2.

Mechanizmus iniciácie a horenia horľavých látok

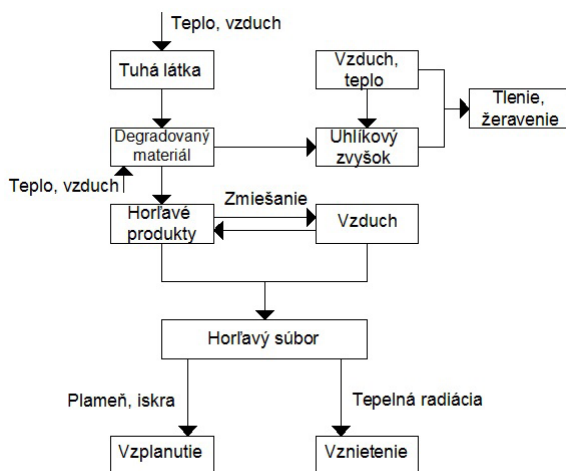
Iniciácia horenia je proces pôsobenia vonkajších faktorov na horľavú látku, ktorého výsledkom je oxidačno-redukčná reakcia medzi horľavou látkou a oxidačným prostriedkom (najčastejšie vzdušným kyslíkom), ktorá uvoľňuje rovnaké alebo väčšie množstvo tepla, ako je potrebné na udržanie tejto exotermickej oxidačno-redukčnej reakcie. V prípade tuhých materiálov je najväčšia časť energie potrebnej na udržanie procesu horenia spotrebovaná na termický rozklad materiálu na plynné rozkladné produkty a v prípade horľavých kvapalín na ich vyparovanie. Medzi uvedené vonkajšie faktory, ktoré môžu spôsobiť iniciáciu horľavých materiálov patrí zvýšená teplota, elektromagnetické žiarenie (najčastejšie tepelná radiácia vo forme infračerveného žiarenia, ale na proces iniciácie látky môže mať vplyv aj elektromagnetické žiarenie iných vlnových dĺžok, napr. ultrafialové žiarenie spôsobuje zrýchlené starnutie materiálov, ktoré môže vyústiť do ich zníženej termickej odolnosti), pôsobenie oxidačného prostriedku (najčastejšie vzdušný kyslík), pôsobenie vzdušnej vlhkosti a ďalšie vonkajšie vplyvy.

Pred samotným popisom mechanizmu iniciácie a horenia horľavých látok je potrebné definovať homogénne a heterogénne horenie. Pri **homogénnom horení** sa horľavá látka a oxidačný prostriedok vyskytujú v rovnakom (plynnom) skupenstve. Homogénne horenie sa označuje aj ako plameňové. Homogénnym spôsobom horia všetky látky horiace plameňom. Homogénnym spôsobom teda horia plynné látky, pary horľavých kvapalín a plynné produkty uvoľňované pri termickom rozklade tuhých horľavých látok. Pri **heterogénnom horení** sa horľavá látka a oxidačný prostriedok nachádzajú v rozdielnom skupenstve (horľavá látka je v tuhom a oxidačný prostriedok v plynnom skupenstve). Heterogénne horenie môže prebiehať dvomi základnými mechanizmami a to *žeravenie a tlenie*. Žeravenie môže byť definované, ako exotermická oxidačno-redukčná reakcia medzi tuhou horľavou látkou a oxidačným prostriedkom prebiehajúca v povrchovej vrstve horľavej látky. Tlenie je špecifický prípad termického rozkladu materiálu, ktorý by za iných podmienok horel homogénnym spôsobom. Tlenie je v podstate termický rozklad materiálu za súčasného uvoľnenia rozkladných produktov, ktorých koncentrácia buď nedosahuje dolnú medzu horľavosti alebo nie je k dispozícii iniciačný zdroj, ktorý by rozkladné produkty inicioval. Mechanizmus iniciácie a horenia horľavých plynov a pár horľavých kvapalín ilustruje obr. 2-6 a tuhých horľavých látok obr. 2-7.

Podľa Osvalda (1997) sa tuhé horľavé látky delia na tie, ktoré sa pôsobením tepla topia, vyparujú alebo sublimujú bez zmeny chemického zloženia a látky, ktoré zahrievaním podliehajú pyrolýze a rozkladu za vzniku plynných prchavých látok a tuhého (uhlíkového) zvyšku. Horenie prvej skupiny látok prebieha rovnako ako v prípade plynov a kvapalín. Horenie týchto látok teda prebieha homogénnym spôsobom. Druhá skupina látok horí homogénnym (horenie plynných rozkladných produktov) aj heterogénnym (horenie tuhého uhlíkového zvyšku) spôsobom.



Obrázok 2-6 Mechanizmus iniciácie a horenia horľavých plynov a pár horľavých kvapalín (Balog a Kvarčák 1999, Šenovský a kol. 2004 a Kvarčák 2005)



Obrázok 2-7 Mechanizmus iniciácie a horenia tuhých horľavých látok (Balog a Kvarčák 1999, Šenovský a kol. 2004, Kvarčák 2005)

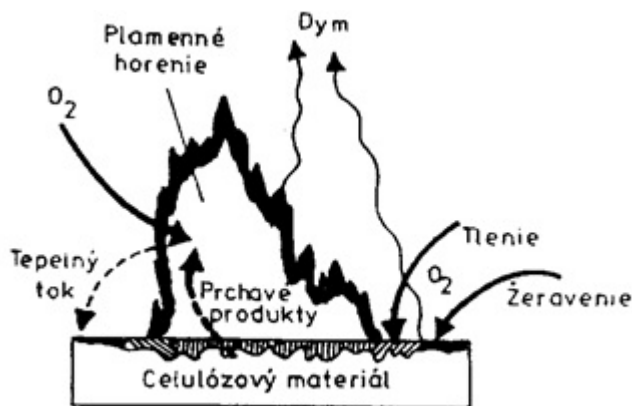
Podľa Kačíkovej (2006) môžu horľavé plyny a pary z tuhých horľavých látok vznikajúť:

- sublimáciou,
- topením a vyparovaním bez chemickej zmeny,
- topením, rozkladom a následným vyparovaním nízkomolekulových frakcií,
- rozkladom na taveninu a následným vyparovaním,
- rozkladom priamo na prchavé produkty.

Proces homogénneho a heterogénneho horenia môže prebiehať súčasne. Počas horenia prchavých rozkladných produktov však nemusí mať vzdušný kyslík umožnený prístup až k povrchu horiaceho materiálu jednak vplyvom jeho reakcie s rozkladnými produktmi v zóne horenia, ako aj vplyvom ich vzlaku. Za týchto podmienok môže k bezplameňovému horeniu (žeraveniu alebo tleniu) dochádzať napr. na rozhraní častí

povrchu horiaceho materiálu z ktorého unikajú prchavé produkty horiace plameňom a povrchu, ktorý nie je zasiahnutý plameňovým horením, tak ako to znázorňuje obr. 2-8. Uvedený spôsob horenia je typický pre materiály na báze celulózy. Schartel a kol. (2007) predpokladajú, že skutočnosť najlepšie vystihuje model, pri ktorom sa tesne nad povrchom homogénnym spôsobom horiaceho materiálu (predhrievaná zóna) nenachádza žiadny kyslík.

Heterogénne horenie môže ďalej prebiehať napr. pri horení materiálu, ktorý bol zbavený plynných prchavých produktov pri plameňovom horení (heterogénne horenie uhlíkového zvyšku) alebo počas zámernej termickej úpravy (napr. horenie drevného uhlia). Za podmienok reálneho požiaru prebieha homogénne a heterogénne horenie súčasne.



Obrázok 2-8 Schéma plameňového a bezplameňového horenia celulóзовého materiálu (Balog 1999)

Podľa pomeru rýchlosti difúzie oxidačného prostriedku k horľavej látke (do zóny horenia) k rýchlosti chemickej reakcie horenia sa horenie delí na **difúzne** a **kinetické**.

Na čas horenia má podstatný vplyv okolnosť, či horľavé zmesi vznikajú už na začiatku ohrevu sústavy alebo až pri vlastnom procese horenia. Čas horenia pozostáva z dvoch etáp: doba styku horľaviny a oxidačného prostriedku (doba difúzie) τ_d a doby vlastnej chemickej reakcie τ_{ch} . Pre dobu horenia potom platí $\tau_h = \tau_d + \tau_{ch}$. Pre homogénne horenie zodpovedá τ_d dobe vytvárania horľavej zmesi, pri heterogénnom horení dobe približovania oxidačného prostriedku (vzdušného kyslíka) z objemu začiatkovej koncentrácie k tuhému horiacemu povrchu (Kalousek 1999).

V prípade, že platí $\tau_d > \tau_{ch}$, teda $\tau_h \approx \tau_d$ je dejom riadiacim rýchlostí procesu horenia difúzia a hovoríme o difúznom horení (alebo o horení vo vysokoteplotnej oblasti). Ak platí $\tau_d < \tau_{ch}$, teda $\tau_h \approx \tau_{ch}$ je rýchlosť procesu horenia riadená len rýchlosťou samotnej chemickej reakcie (alebo presnejšie chemických reakcií) horenia a vtedy hovoríme o horení v kinetickej oblasti (nízko- a stredoteplotné alebo explozívne horenie). Prípád $\tau_d \approx \tau_{ch}$ je teoretický a označuje sa ako horenie v prechodovej oblasti (Kalousek 1999). V skutočnosti by sa však proces horenia približoval horeniu v kinetickej oblasti. Dôvodom je skutočnosť, že pri horení materiálov v kompaktnej forme (napr. drevo a polyetylén) alebo rozliatych horľavých kvapalín, prípadne horľavých kvapalín v nádrži je čas difúzie rádov vyšší ako čas samotnej chemickej reakcie. Teda pri skrátení času difúzie na čas približne rovný času samotnej chemickej reakcie bude mať horenie charakter kinetického horenia. Typickým príkladom kinetického horenia je explózia horľavého plynu, pary horľavej kvapaliny alebo organického prachu, prípadne explózia termobarickej bomby.

Zjednodušene je teda možné konštatovať, že proces zisťovania pr ichn vlniku požiarov je proces zistenia pr ichny nežiaduceho difúzneho horenia, zatiaľ čo proces zisťovania pr ichn vlniku explózii horľavých plynov, pár a rozvírených prachov je proces zistenia pr ichny kinetického horenia. Z chemického hľadiska teda významný rozdiel medzi požiarom a explóziou horľavých plynov, pár a rozvírených prachov neexistuje, resp. oba deje majú v zásade rovnak  chemick  podstatu (rýchlu exotermick  oxidaa no-reduk n  reakciu medzi horľavou látkou a oxidaa n m prostriedkom). Preto sa zisťovanie pr ichn vlniku požiarov a explózii horľavých plynov, pár a rozvírených prachov chápe ako jeden proces.

Pre pochopenie procesu iniciaa cie bude uvedený stručný popis dejov spojených s iniciaa ciou organických polymérov. Pri zahrievaní organického materiálu dochádza k uvoľňovaniu prchavých horľavých produktov. Potom pre každý tak to materiál existuje teplota, pri ktorej sa horľavé plyny uvoľňujú takou rýchlosťou, že ich iniciovann m externým zdrojom tepla (napr. plameňom) nastane proces plameňového horenia. Uvedená teplota (okrem chemického zloženia a štruktúry materiálu) závisí od druhu a koncentracie oxidaa n ho prostriedku a fyzikálnych vlastností materiálu. Uvedená teplota môže byť rozdelená na minimálnu teplotu, pri ktorej dôjde k zapáleniu zmesi prchavých produktov s oxidaa n m prostriedkom (prídavným zdrojom tepla) a následnému prerušeniu procesu horenia a na minimálnu teplotu, ktorá umožní trvalé horenie materiálu. Pri zvy sovann i teploty pôsobiacej na daný materiál nastane situaa cia, že k iniciaa cii procesu horenia nebude potrebný prídavný zdroj tepla (najčastejšie plameň). Medzi uvedenými teplotami existuje podstatný rozdiel. Prvá teplota sa vzťahuje na rýchlosť rozkladu materiálu a druhá na iniciaa ciu rozkladných produktov. Principiálne by malo platiť, že by mala posta ovaať teplota prídavného zdroja zhodná s minimálnou teplotou iniciaa cie, pri ktorej už nie je potrebný prídavný zdroj tepla.  al ším významným parametrom je **indukčná per ioda**, čo je čas od začiatku pôsobenia zdroja iniciaa cie na horľavý materiál do zahájenia procesu horenia, pričom platí, že so vzrastajúcou teplotou zdroja iniciaa cie, klesá čas indukčnej per iody. Naopak, s klesajúcou teplotou narastá čas indukčnej per iody až do hodnoty, kedy k zapáleniu už nemôže dôjsť.

V odbornej literatúre a technických normách sa môžeme stretn i s rôznymi odbornými termínmi vyjadrujúcimi kritické podmienky pre iniciaa ciu procesu horenia, napr. teplota vzplanutia, teplota vznietenia, teplota horenia, bod vzplanutia apod. Definície uvedených požiarnotechnických charakteristík sú podrobne popisan e v kapitole 10. Nevýhodou odborných termínov pou ivan ch v technických normách je, že rovnaký odborných termín v dvoch rôznych technických normách môže mať rozdielny význam, navyše často sa stáva, že jeden odborný termín m a odlišný význam pre látky s rôznym skupenstvom. Pre popisaa nie procesu iniciaa cie horenia budú preto použité odborné termíny vychádzajúce zo samotnej podstaty iniciaa cie. Výhodou takého postupu je jednak fakt, že nebude dochádzať k nezrovnalostiam vyplývajúcim z rozdielnosti terminológie pre horľavé látky s rôznym skupenstvom, ako aj skutočnosť, že použité termíny majú univerzálnu a nad asov  platnosť (nedotýkajú sa ich zmeny v technických normách). Medzi uvedené termíny pat ri **kritická teplota termického rozkladu** (tuhé látky horiace plameňom) alebo **vyparovania** (horľavé kvapaliny) a **kritická teplota iniciaa cie rozkladných plyných produktov** (tuhé látky horiace plameňom), **pár** (horľavé kvapaliny) alebo **heterog enného horenia na povrchu tuhého materiálu** (materiály, resp. ich degradovaný zvyšok horiace heterogénnym spôsobom). Okrem teploty môžu byť kritické podmienky pre iniciaa ciu procesu horenia vyjadrené **kritickou hustotou tepelného toku** pren shan ho tepelnou konvekciou alebo tepelnou radiáciou. Hustota tepelného toku pren shan ho

do materiálu tepelnou konvekciou (prúdením) sa počíta podľa rovnice [2.22]. Vzhľadom na to, že hustota tepelného toku prenášaného tepelnou konvekciou je determinovaná rozdielom teplôt medzi vzorkou a horúcim vzduchom môžu byť podmienky iniciácie vyjadrené kritickou teplotou a zvyčajne nie je potrebné uvažovať s kritickou hustotou tepelného toku. S hustotou tepelného toku prenášaného tepelným prúdením sa však uvažuje v prípade identifikácie stôp po požiari (kapitola 8). Hustota tepelného toku prenášaného na povrch materiálu je daná rovnicou [2.33]. V tomto prípade je, na rozdiel od hustoty tepelného toku prenášaného konvekciou, nutné uvažovať s hustotou tepelného toku a nie teplotou povrchu (vyžarujúceho infračervené žiarenie). Kritická hustota tepelného toku prenášaného radiáciou sa delí na **kritickú hustotu tepelného toku termického rozkladu** (tuhé látky horiace plameňom) alebo **vyparovania** (horľavé kvapaliny) a **kritickú hustotu tepelného toku iniciácie rozkladných plynných produktov** (tuhé látky horiace plameňom) **pár** (horľavé kvapaliny) alebo **heterogénneho horenia na povrchu tuhého materiálu** (materiály, resp. ich degradovaný zvyšok horiaci heterogénnym spôsobom).

Kritická teplota termického rozkladu je minimálna teplota (horúceho vzduchu alebo povrchu) potrebná na rozklad tuhého materiálu alebo vyparovanie horľavej kvapaliny rýchlosťou postačujúcou na dosiahnutie dolnej medze horľavosti rozkladných plynov alebo pár. Kritická teplota iniciácie rozkladných produktov alebo pár je minimálna teplota (horúceho vzduchu alebo povrchu) potrebná na iniciáciu plameňového horenia rozkladných produktov. V zmysle definícií teploty vzplanutia a vznietenia v ISO 871:2006 môže byť **teplota vznietenia** tuhej horľavej látky (minimálna teplota horúceho vzduchu prúdiaceho okolo vzorky, ktorá spôsobí jej zapálenie bez použitia prípadného zdroja zapálenia – malý plameň) približne stotožnená s kritickou teplotou iniciácie plynných rozkladných produktov a **teplotu vzplanutia** (minimálna teplota horúceho vzduchu prúdiaceho okolo vzorky, ktorá spôsobí jej zapálenie pri použití prípadného zdroja zapálenia pôsobiaceho na rozkladné produkty – malý plameň) je možné približne stotožniť s kritickou teplotou termického rozkladu tuhých horľavých materiálov. Kritická teplota iniciácie heterogénneho horenia na povrchu tuhého materiálu je minimálna teplota (horúceho vzduchu alebo povrchu) potrebná na iniciáciu heterogénneho horenia (žeravenia) na povrchu tuhého materiálu. Do uvedenej definície kritickej teploty iniciácie heterogénneho horenia spadá len jeden druh bezplameňového horenia (žeravenie), nakoľko tlenie je špecifický prípad termického rozkladu materiálu horiaceho za iných podmienok homogénnym spôsobom. Z porovnania teplôt vzplanutia a vznietenia stanovených napr. Balogom (1999) vyplýva, že kritická teplota termického rozkladu je takmer u všetkých organických polymérov nižšia, ako kritická teplota iniciácie plameňového horenia rozkladných produktov.

Kritická hustota tepelného toku termického rozkladu je minimálna hustota tepelného toku potrebná na rozklad tuhej látky na plynné produkty termického rozkladu alebo vyparovanie horľavej kvapaliny takou rýchlosťou, aby tieto dosiahli dolnú medzu horľavosti. Kritická hustota tepelného toku iniciácie plynných produktov termického rozkladu alebo pár je minimálna hustota tepelného toku potrebná na iniciáciu plameňového horenia plynných produktov rozkladu alebo pár horľavých kvapalín. Z výsledkov vedeckej práce Shi Chew (2013) vyplýva, že kritická hustota tepelného toku iniciácie je vyššia, ako kritická hustota tepelného toku termického rozkladu.

Okrem kritickej teploty alebo kritickej hustoty tepelného toku môže byť podmienka pre iniciáciu materiálu vyjadrená prostredníctvom kritickej (minimálnej) energie. Kritická energia je minimálne množstvo energie potrebné na ohriatie látky na teplotu potrebnú na jej zapálenie. Kritická energia sa počíta podľa rovnice [2.48].

$$Q_{\text{krit}} = m \cdot c_p \cdot (t_K - t_a) \quad (\text{J}) \quad [2.48]$$

Q_{krit} : kritická energia iníciaie látky (J)

m : hmotnosť látky (kg)

c_p : špecifická tepelná kapacita látky pri konštantnom tlaku ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

t_K : kritická teplota látky ($^{\circ}\text{C}$)

t_a : teplota okolia (počiatočná teplota látky) ($^{\circ}\text{C}$)

Praktická aplikácia rovnice [2.48] pri posudzovaní odolnosti materiálu voči inícii horenia alebo pre potreby zisťovania príčin vzniku požiaru je však značne obmedzená. Dôvodom je závislosť tepelnej kapacity látok od teploty a tepelná hrúbka materiálu. Počas iníciaie materiálu navyše dochádza k jeho termickému rozkladu, preto od určitého času by bolo presnejšie hovoriť o tepelnej kapacite produktov termického rozkladu materiálu v povrchovej vrstve. Za reálnych podmienok nepoznáme presné chemické zloženie látok nachádzajúcich sa v termicky rozloženej povrchovej vrstve konkrétnej látky. Okrem toho tepelne hrubé materiály nie sú počas iníciaie prehriate na kritickú teplotu v celom svojom objeme.

2.3.

Iníciačné zdroje

Iníciačný zdroj je energetický zdroj dodávajúci látke energiu potrebnú na jej iníciaiu. Iníciačným zdrojom určitej horľavej látky sa môže stať predmet alebo látka, ktorá má určitú (minimálnu) teplotu a je schopná v určitom časovom intervale (vyššom ako indukčná perióda pre danú teplotu) odovzdať horľavej látke potrebné množstvo energie príslušného druhu. Iníciačný zdroj je vždy vzťahnutý k určitej horľavej látke alebo výbušnému súboru. Výnimku tvoria iníciačné zdroje, ktoré sú schopné iniciovať prakticky všetky horľavé súboru (plameň alebo horúci povrch) (Damec 1998).

Pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov sa iníciačné zdroje delia na:

- plameň,
- horúci povrch,
- tepelné prejavy elektrického prúdu,
- tepelné prejavy mechanickej energie,
- exotermické chemické reakcie (iné ako plameň).

2.3.1.

Plameň

Plameň spolu s horúcim povrchom predstavuje najúčinnnejší iníciačný zdroj. Jeho teplota sa obvykle pohybuje od 700 do 1500 $^{\circ}\text{C}$, ale môže dosiahnuť aj teplotu vyše 3000 $^{\circ}\text{C}$ (napr. plameň zmesi acetylénu a kyslíka). Splodiny horenia obsahujú horúce plyny alebo pri horení prachu a nedokonalom horení tiež tuhé žeraviace častice. Plameňom je možné iniciovať prakticky všetky horľavé látky. Dokonca plameň malých rozmerov patrí medzi účinné iníciačné zdroje (Damec 1998). Vysoká schopnosť iníciaie plameňom nie

je daná len jeho vysokou teplotou ale aj prítomnosťou voľných radikálov v plameni (najmä radikály OH•, O• a H•), ktoré dokážu veľmi účinne iniciovať retazové reakcie horenia.

Problematika teoretickej teploty plameňa a žiarenia plameňa sú podrobne popísané v podkapitolách 2.1.3.1 a 2.1.3.2. Teploty plameňa vybraných iniciačných zdrojov sú uvedené v tabuľke 2-10.

Tabuľka 2-10 Teplota plameňa vybraných iniciačných zdrojov

Zdroj plameňa	Teplota plameňa (°C)
Horiaca zápalka	740 – 800
Horiaca sviečka	650 – 950
Horiaci papier	800 – 1000
Plameň zapalovača	650 – 860

Prameň: Balog a Janto (1998)

Najdostupnejším zdrojom otvoreného ohňa sú zápalky a zapalovače. Zápalky a zapalovače patria medzi voľnopredajný tovar a bežne sa vyskytujú prakticky v každej domácnosti. Zaujímavý experiment zameraný na posúdenie účinnosti zápaliek ako iniciačného zdroja vykonal Maguire (2004). Citovaný autor vykonal experiment v ktorom jeho účastníci zapalovali zápalky a voľne ich hádzali cez rameno za seba. Každý účastník experimentu hodil voľne cez rameno za seba 2 x 100 zápaliek. Následne nechávali voľným pádom padať zapálené zápalky na pásy papiera. Zo získaných údajov vyplýva:

- približne 70 % zápaliek dopadlo na plochu približne ohraničenú kruhom s priemerom 1m,
- všetky zápalky dopadli do kruhu s priemerom rovnajúcom sa približne výške osoby hádzajúcej zápalky,
- zo 100 voľne pustených zapálených zápaliek z výšky 750 mm na pásy papiera spôsobilo zapálenie papiera 20 zápaliek,
- zo 100 voľne pustených zapálených zápaliek z výšky 1 m na pásy papiera spôsobilo zapálenie papiera 11 zápaliek,
- z 10 voľne pustených zapálených zápaliek z výšky 3 m všetky zhasli vo vzduchu.

2.3.2.

Horúci povrch

Ďalším významným iniciačným zdrojom sú horúce povrchy, ktoré môžu byť zahriate tepelnou energiou alebo tepelným prejavom inej energie (napr. mechanickej). Maximálna dovolená teplota horúceho povrchu sa stanovuje na základe teploty vznietenia, alebo samovznietenia prítomného horľavého súboru. Iniciačná schopnosť horúceho povrchu nenarastá len s jeho narastajúcou teplotou, ale aj plochou (Damec 1998).

Iniciácia materiálu od horúceho povrchu je prakticky možná tromi spôsobmi. Prvým je pri priamom kontakte materiálu s horúcim povrchom, druhým následkom tepelnej radiácie z horúceho povrchu na povrchu materiálu a tretím následkom tepelnej konvekcie.

V prvom prípade je rozhodujúcim dejom prenos tepla vedením z horúceho povrchu do iniciovanej látky. Príkladom môže byť vznietenie materiálu pri jeho lisovaní za tepla, keď následkom poruchy regulácie stúpne teplota na lisovacích platniach nad kritickú hodnotu.

V druhom prípade je rozhodujúcim dejom prenos tepla radiáciou z horúceho povrchu. Príkladom môže byť vznietenie látky pri jej umiestnení príliš blízko infračerveného ohrievača. Ako vyplýva z rovnice [2.33] hustota tepelného toku prenášaného radiáciou medzi horúcim povrchom a ohrievaným telesom nezávisí len od rozdielu teplôt ale aj od emisivity povrchu a uhlového koeficienta ožiarenia. Preto zmena teploty horúceho povrchu nie je jediný parameter, ktorý môže spôsobiť požiar týmto mechanizmom. Ohriatie materiálu na teplotu vyššiu ako kritická môže spôsobiť aj zmena jeho orientácie vzhľadom na horúci povrch (pri nezmenenej vzdialenosti alebo teplote) a rovnako zmena emisivity povrchu. Emisivita horúceho povrchu sa môže zvýšiť napr. následkom jeho zoxidovania, zvýšenia drsnosti (napr. následkom rozsiahleho poškrabania) alebo natretia farbou s vyššou emisivitou.

Pri treťom prípade sa uplatňuje prenos tepla z horúceho povrchu tepelnou konvekciou. Hustota tepelného toku pri prenose tepla tepelnou konvekciou sa počíta podľa rovnice [2.22]. Príkladom je iniciácia materiálu následkom jeho exponovania horúcim vzduchom z teplovzdušnej pištole (v teplovzdušnej pištoli sa vzduch ohrieva prúdením okolo horúceho povrchu). Na tomto mieste je však potrebné upozorniť že druhý a tretí prípad sa málokedy vyskytuje samostatne. Takmer vždy pokiaľ dôjde k iniciácii látky od horúceho povrchu, tak sa na prenose tepla podieľa tepelná konvekcia aj tepelná radiácia. Pokiaľ je však podiel tepla preneseného jedným z uvedených spôsobov podstate vyšší ako druhým je možné uvažovať len s týmto prípadom. Ak je však množstvo preneseného tepla oboma spôsobmi približne rovnaké ide o kombinovaný prenos tepla. Na prenos tepla prúdením má významný vplyv vzájomná orientácia horúceho povrchu a ohrievaného telesa. Napr. pri rovnakej ploche, teplote a vzdialenosti horúceho povrchu od ohrievaného telesa sa do telesa preniesie tepelným prúdením približne o 60% tepla viac ak je teleso umiestnené nad horúcim povrchom ako keby bolo umiestnené pod horúcim povrchom. Hustota tepelného toku prenášaného radiáciou sa však v tomto prípade nemení.

2.3.3.

Tepelné prejavy elektrického prúdu

Tepelné prejavy elektrickej energie predstavujú podľa oficiálnych štatistík pomerne častú príčinu vzniku požiaru. Napriek tomu, že v časti odbornej verejnosti prevláda názor, že tepelné prejavy elektrického prúdu sú ako príčina vzniku požiaru stanovené častokrát následkom chyby, jedná sa častú a významnú príčinu vzniku požiarov.

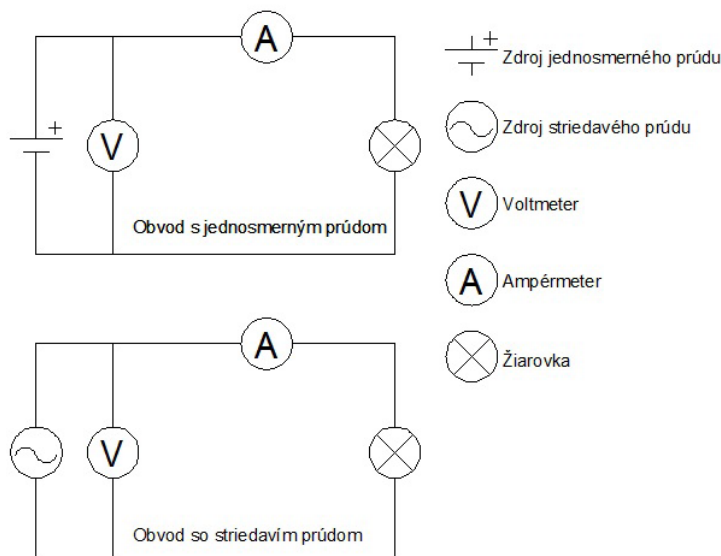
Elektrický prúd môže spôsobiť požiar v prípade nasledovných javov:

- skrat,
- zvýšený prechodový odpor,
- preťaženie,
- elektrický oblúk,
- elektrická iskra,
- statická elektrina,
- nesprávna inštalácia elektrického zariadenia.

Vznik ktoréhokoľvek z vyššie uvedených javov môže, ale nemusí spôsobiť požiar. Pre pochopenie mechanizmov vzniku jednotlivých vyššie uvedených javov a možností, ako tieto môžu spôsobiť požiar, je potrebné najskôr uviesť základné poznatky z elektrotechniky.

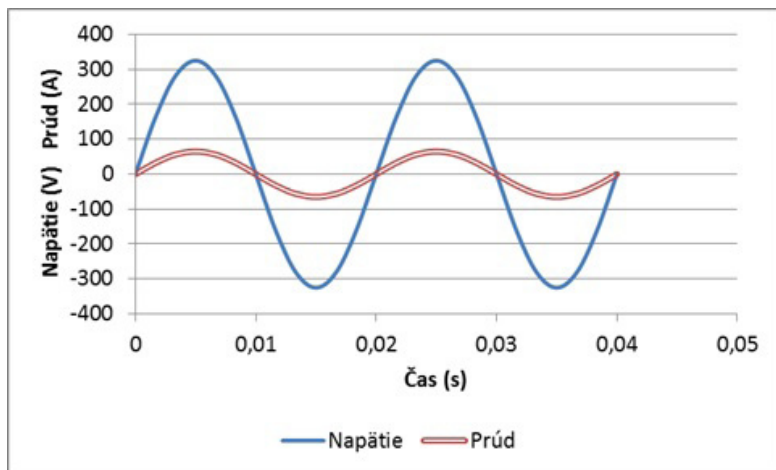
Jednoduchý elektrický obvod, pozostávajúci zo zdroja elektrického napätia, elektrických vodičov, ampérmetra, voltmetra a žiarovky (záťaže), je znázornený na obr. 2-9. Podľa závislosti veľkosti elektrického prúdu od času sa tento delí na **striedavý** a **jednosmerný**³. Striedavý elektrický prúd sa vyznačuje tým, že v čase sa neustále mení jeho veľkosť z kladnej na zápornú hodnotu a naopak (zmena veľkosti elektrického prúdu vyjadruje vlastne zmenu smeru jeho toku, preto sa takýto elektrický prúd nazýva striedavý). Veľkosť jednosmerného elektrického prúdu môže byť v čase konštantná (rovnosmerný alebo stabilizovaný jednosmerný elektrický prúd) alebo premenlivá (pulzujúci jednosmerný elektrický prúd). Pri premenlivom jednosmernom elektrickom prúde, na rozdiel od striedavého, nedochádza k zmene jeho hodnoty z kladnej na zápornú a naopak, ale jeho hodnota sa mení len v rámci jednej polarity (kladnej alebo zápornej). Príklad časového priebehu striedavého elektrického napätia a prúdu ilustruje obr. 2-10 a jednosmerných elektrických napätí a prúdov obr. 2-11 a 2-12.

V technickej praxi sa využíva striedavý aj jednosmerný elektrický prúd. Takmer všetky elektrárne (atómové, vodné, tepelné a veterné) a teplárne vyrábajú striedavý elektrický prúd. Výnimku predstavujú prakticky len fotovoltaické elektrárne, ktoré vyrábajú jednosmerný prúd. Podiel fotovoltaických elektrární na celkovom množstve vyrobenej elektrickej energie na Slovensku, ale aj vo svete je však v súčasnosti zanedbateľný. Ak je fotovoltaická elektráreň pripojená do verejnej distribučnej siete musí byť vyrobený jednosmerný prúd upravený na striedavý v tzv. striedačoch (distribučná sústava neumožňuje súčasný prenos striedavého aj jednosmerného prúdu). Okrem fotovoltaických elektrární sa jednosmerné napätie vyrába napr. v palivových alebo galvanických článkoch. Takto vyrobený jednosmerný elektrický prúd sa nedodáva do verejnej distribučnej siete, ale využíva sa v blízkosti miesta jeho výroby.



Obrázok 2-9 Príklad zapojenia jednoduchého obvodu s jednosmerným a striedavým elektrickým prúdom

³ V anglicky písanej literatúre je pre jednosmerný prúd používa skratka DC (Direct Current) a pre striedavý AC (Alternating Current).



Obrázok 2-10 Príklad časového priebehu striedavého elektrického napätia a prúdu

Jedným z dôvodov, prečo sa v technickej praxi využíva predovšetkým striedavý prúd je, že pri jeho prenose vznikajú podstate nižšie straty, ako pri prenose jednosmerného prúdu. Striedavé elektrické napätie okrem toho umožňuje podstatne jednoduchšiu úpravu jeho parametrov (veľkosť napätia, frekvenciu a prípadné usmernenie na jednosmerné) ako jednosmerné napätie. Výhodou striedavého prúdu je aj fakt, že pri skrate dochádza k uvoľňovaniu tepla (taveniu vodičov) len vmieste skratu, zatiaľ čo v prípade jednosmerného prúdu sa uvoľňuje teplo po celej dĺžke vodiča a dochádza k jeho taveniu po celej dĺžke (od zdroja až po miesto vzniku skratu). V Slovenskej republike sa s prenosom jednosmerného prúdu (určeného na napájanie silových elektrických zariadení) na relatívne väčšie vzdialenosti môžeme stretnúť pri vybraných trakčných vedeniach.

V technickej praxi sa so striedavým elektrickým prúdom stretávame predovšetkým vo fáze výroby elektrickej energie, jej prenose a distribúcií verejnou distribučnou sieťou a pri napájaní vybraných elektrických zariadení (napr. elektrotepelných spotrebičov a elektromotorov). Vo väčšine elektrických zariadení sa však striedavé elektrické napätie (ktoré sa používa na ich napájanie) upraví na požadovanú hodnotu v transformátore, usmerní usmerňovačom a na napájanie jednotlivých častí zariadenia sa ďalej používa jednosmerné napätie a prúd. Príkladom takýchto zariadení je televízor, počítač, notebook a množstvo ďalších. Často sa vyskytuje aj prípad, keď sa v rámci jedného elektrického zariadenia využíva súčasne striedavé aj jednosmerné napätie. Typickým príkladom je práčka, ktorá na napájanie výhrevného telesa využíva striedavé elektrické napätie, zatiaľ čo riadiacu elektroniku napája jednosmerným napätím. Typickým príkladom zariadenia napájaného jednosmerným napätím je automobil.

V obvode s jednosmerným zdrojom napätia (obr. 2-9) je možné vyjadriť pomery prostredníctvom veľkosti napätia a prúdu. Medzi napätím a prúdom platí Ohmov zákon [2.49].

$$I = \frac{U}{R} \quad (\text{A}) \quad [2.49]$$

I : veľkosť elektrického prúdu tečúceho obvodom (A)

U : napätie na svorkách zdroja (A)

R : celkový elektrický odpor obvodu (Ω)

Ohmov zákon platí aj pre obvod so zdrojom striedavého napätia, ale na popísanie pomerov v tomto obvode je potrebných viac parametrov. Ďalej popísané parametre striedavého prúdu v podstate platia aj pre periodické jednosmerné napätie.

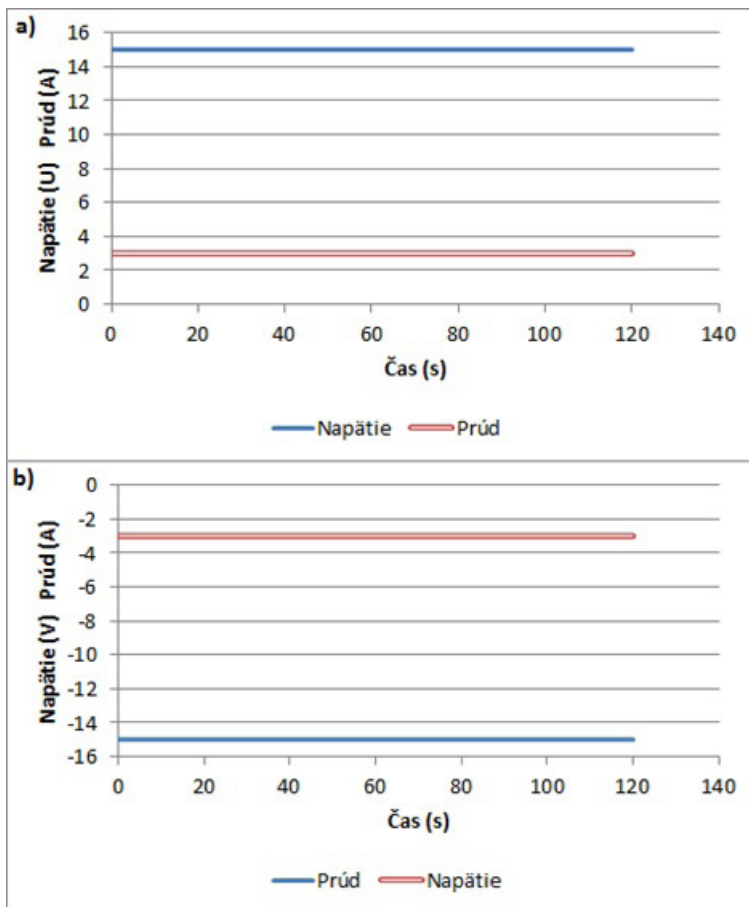
Základným parametrom charakterizujúcim striedavé napätie a prúd je frekvencia., ktorá je vyjadrená rovnicou [2.50].

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Hz)} \quad [2.50]$$

f : frekvencia striedavého napätia a prúdu ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$)

T : perióda striedavého napätia a prúdu (s)

Periódou striedavého napätia a prúdu je čas, za ktorý striedavé napätie alebo prúd dosiahne rovnakú (napr. maximálnu alebo minimálnu) hodnotu. Frekvencia udáva vlastne počet periód za sekundu. Dôležitým parametrom striedavého elektrického napätia a prúdu je uhlová frekvencia, ktorá sa počíta podľa rovnice [2.51].



Obrázok 2-11 Časový priebeh stabilizovaného jednosmerného napätia a prúdu
 s a) kladnou a b) zápornou polaritou

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}) \quad [2.51]$$

ω : uhlová frekvencia ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)

Okamžité hodnoty striedavého napätia a striedavého prúdu sa počítajú podľa rovníc [2.52 a 2.53].

$$u(t) = U_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_u) \quad (\text{V}) \quad [2.52]$$

$$i(t) = I_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_i) \quad (\text{V}) \quad [2.53]$$

$u(t)$: okamžitá hodnota striedavého napätia (V)

$i(t)$: okamžitá hodnota striedavého prúdu (A)

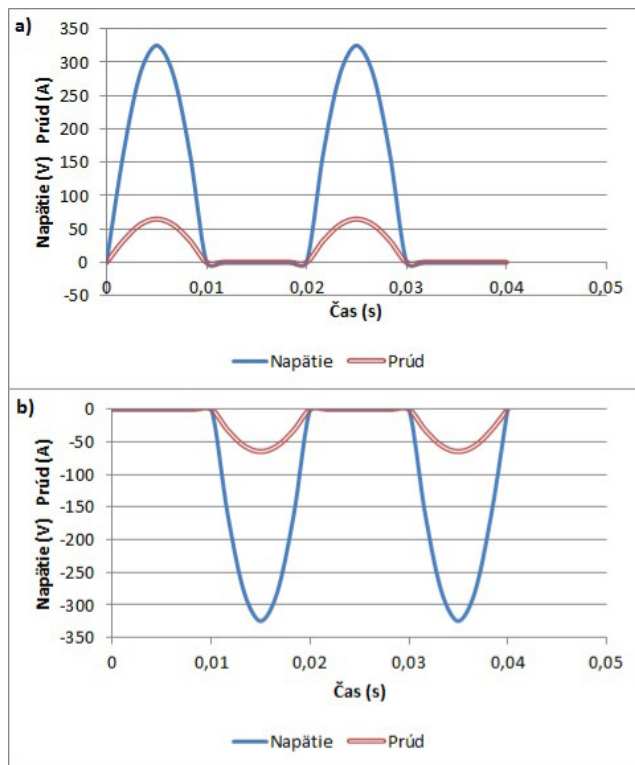
U_{\max} : maximálna hodnota striedavého napätia (V)

I_{\max} : maximálna hodnota striedavého prúdu (A)

t : čas (s)

φ_u : fázový posun napätia voči prúdu (rad)

φ_i : fázový posun prúdu voči napätiu (rad)



Obrázok 2-12 Časový priebeh pulzujúceho jednosmerného napätia a prúdu
s a) kladnou a b) zápornou polaritou

Ako vyplýva z obr. 2-10 okamžitá hodnota striedavého napätia a prúdu sa neustále mení. V praxi bolo preto potrebné nájsť hodnotu, ktorá by reprezentovala napätie a prúd v obvodoch s periodickým zdrojom elektrického napätia. Za uvedeníu reprezentatívnu hodnotu nemohla byť zvolená stredná hodnota, nakoľko stredná hodnota periodicky striedavého napätia a prúdu je rovná nule (obr. 2-10). Z uvedeného dôvodu bola v elektrotechnike zavedená efektívna hodnota striedavého napätia a prúdu. Efektívne hodnoty striedavého napätia a prúdu sú také hodnoty konštantného jednosmerného napätia a prúdu, ktorých výkon by bol rovnaký, ako výkon striedavého napätia a prúdu. Efektívne hodnoty striedavého napätia a prúdu sa počítajú podľa rovníc [2.54 a 2.55].

$$U_{\text{ef}} = U_{\text{max}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{V}) \quad [2.54]$$

$$I_{\text{ef}} = I_{\text{max}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{A}) \quad [2.55]$$

U_{ef} : efektívna hodnota striedavého napätia (V)

I_{ef} : efektívna hodnota striedavého prúdu (A)

Dôležitým parametrom vyjadrujúcim pomery v obvode s jednosmerným aj striedavým zdrojom elektrického napätia je výkon. Výkon v obvode so zdrojom jednosmerného napätia sa počíta podľa rovnice [2.56]. Na rozdiel od obvodov s jednosmerným prúdom v obvodoch so striedavým prúdom existujú až tri druhy výkonu a to zdanlivý, činný a jalový, ktoré sa počítajú podľa rovníc [2.57 až 2.59].

$$P = U \cdot I \quad (\text{W}) \quad [2.56]$$

P : výkon jednosmerného elektrického prúdu (W)

$$P_{\text{zd}} = U_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}} \quad (\text{W}) \quad [2.57]$$

$$P_{\text{c}} = U_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}} \cdot \cos(\varphi_i) \quad (\text{W}) \quad [2.58]$$

$$P_{\text{j}} = U_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}} \cdot \sin(\varphi_i) \quad (\text{W}) \quad [2.59]$$

P_{zd} : zdanlivý výkon striedavého elektrického prúdu (W)

P_{c} : činný výkon striedavého elektrického prúdu (W)

P_{j} : jalový výkon striedavého elektrického prúdu (W)

V technickej praxi je snaha, aby sa hodnota činného výkonu čo najviac blížila hodnote zdanlivého elektrického výkonu a hodnota jalového výkonu aby sa čo najviac blížila nule. Pre posúdenie tepelného zaťaženia od elektrického prúdu (nie len pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov) je rozhodujúca hodnota zdanlivého výkonu striedavého elektrického prúdu.

Fázový posun striedavého prúdu voči napätiu spôsobujú v obvodoch súčiastky s indukčnosťou alebo kapacitou. Súčiastkou s kapacitou je kondenzátor a s indukčnosťou cievka. Uvedené delenie však platí len približne v oblasti nízkofrekvenčnej techniky, nakoľko v oblasti vysokých frekvencií vykazuje istú (parazitnú) kapacitu aj cievka a naopak kondenzátor vykazuje určitú (parazitnú) indukčnosť. V oblasti vysokých frekvencií

sa rovnako prejavuje indukčnosť a kapacita aj ostatných súčiastok (a častí), ktoré majú inú primárnu vlastnosť. Typickým príkladom je rezistor, ktorého primárnou vlastnosťou v obvode je jeho odpor, ale pri vysokých frekvenciách sa prejavuje aj jeho kapacita a indukčnosť.

Na ideálnom kondenzátore predbieha fázor striedavého prúdu fázor striedavého napätia o 90° ($\pi/2$ periódy). Naopak, na ideálnej cievke fázor napätia predbieha o 90° ($\pi/2$ periódy) fázor prúdu.

V elektrárňach sa vyrába trojfázové elektrické napätie a elektrický prúd v trojfázovom generátore. Vinutia statora takéhoto trojfázového generátora sú zapojené do hviezdy. Spojenie do hviezdy znamená, že začiatky všetkých troch vinutí sú spojené do jedného bodu a z konca každého vinutia je vyvedený jeden vodič. Tieto vodiče sa nazývajú krajné (alebo v staršej literatúre fázové). Okrem toho je jeden vodič vyvedený zo spoločného bodu v ktorom sú spojené začiatky vinutí. Tento vodič sa nazýva neutrálny. Napätie medzi ľubovoľným krajným a neutrálnym vodičom sa nazýva fázové a prúd tečúci medzi ktorýmkoľvek krajným vodičom a neutrálnym vodičom fázový prúd. Napätie medzi ľubovoľnými dvomi fázovými vodičmi sa nazýva združené a prúd tečúci medzi ktorýmkoľvek dvomi krajnými vodičmi združený.

Vinutia v statore sú vzájomne oproti sebe posunuté o 120° . Následkom posunu vinutí v statore sú výstupné fázové napätia z nich vzájomne oproti sebe posunuté rovnako o 120° ($2/3 \pi$ periódy). O rovnakú hodnotu sú vzájomne posunuté aj fázové elektrické prúdy (uvedený záver je zjednodušený, nakoľko zanedbáva vzájomný posun fázora elektrického napätia a elektrického prúdu). Okamžité hodnoty fázových striedavých napätí sú dané rovnicami [2.60 až 2.62] a okamžité hodnoty fázových striedavých prúdov sú dané rovnicami [2.63 až 2.65]. Takto vyrobené elektrické napätie a prúd sa prenáša prostredníctvom prenosovej a distribučnej sústavy ku koncovým spotrebiteľom.

$$u(t)_1 = U_{1\max} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (\text{V}) \quad [2.60]$$

$$u(t)_2 = U_{2\max} \cdot \cos(\omega \cdot t + \frac{2}{3} \cdot \pi) \quad (\text{V}) \quad [2.61]$$

$$u(t)_3 = U_{3\max} \cdot \cos(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi) \quad (\text{V}) \quad [2.62]$$

$u(t)_1, u(t)_2, u(t)_3$: okamžité hodnoty fázových napätí (V)

$U_{1\max}, U_{2\max}, U_{3\max}$: maximálne hodnoty fázových napätí (V)

$$I(t)_1 = I_{1\max} \cdot \cos(\omega \cdot t - \varphi_{i1}) \quad (\text{V}) \quad [2.63]$$

$$I(t)_2 = I_{2\max} \cdot \cos(\omega \cdot t + \frac{2}{3} \cdot \pi - \varphi_{i2}) \quad (\text{V}) \quad [2.64]$$

$$I(t)_3 = I_{3\max} \cdot \cos(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi - \varphi_{i3}) \quad (\text{V}) \quad [2.65]$$

$I(t)_1, I(t)_2, I(t)_3$: okamžité hodnoty fázových prúdov (V)

$I_{1\max}, I_{2\max}, I_{3\max}$: maximálne hodnoty fázových prúdov (V)

Efektívne hodnoty fázových napätí sa počítajú podľa rovníc [2.66 až 2.68] a efektívne hodnoty fázových prúdov podľa rovníc [2.69 až 2.71].

$$U_{1ef} = U_{1max} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{V}) \quad [2.66]$$

$$U_{2ef} = U_{2max} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{V}) \quad [2.67]$$

$$U_{3ef} = U_{3max} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{V}) \quad [2.68]$$

U_{1ef} , U_{2ef} , U_{3ef} : efektívne hodnoty fázových napätí (V)

$$I_{1ef} = I_{1max} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{A}) \quad [2.69]$$

$$I_{2ef} = I_{2max} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{A}) \quad [2.70]$$

$$I_{3ef} = I_{3max} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{A}) \quad [2.71]$$

I_{1ef} , I_{2ef} , I_{3ef} : efektívne hodnoty fázových prúdov (A)

Efektívne hodnoty združených napätí sa počítajú podľa rovníc [2.72 až 2.74] a efektívne hodnoty fázových prúdov podľa rovníc [2.75 až 2.77]

$$U_{12ef} = \sqrt{3} \cdot U_{1ef} \quad (\text{V}) \quad [2.72]$$

$$U_{23ef} = \sqrt{3} \cdot U_{2ef} \quad (\text{V}) \quad [2.73]$$

$$U_{13ef} = \sqrt{3} \cdot U_{3ef} \quad (\text{V}) \quad [2.74]$$

U_{12ef} , U_{23ef} , U_{13ef} : efektívne hodnoty združených napätí medzi krajnými vodičmi 1 a 2, 2 a 3, 1 a 3 (V)

$$I_{12ef} = \sqrt{3} \cdot I_{1ef} \quad (\text{V}) \quad [2.75]$$

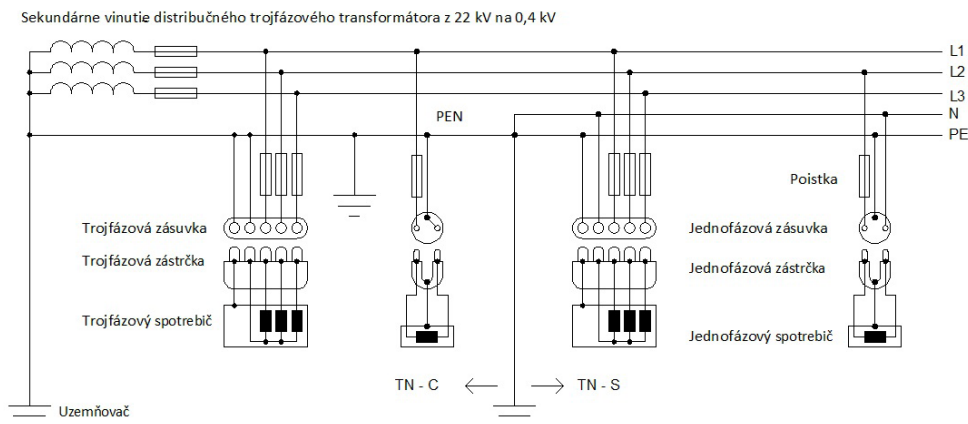
$$I_{23ef} = \sqrt{3} \cdot I_{2ef} \quad (\text{V}) \quad [2.76]$$

$$I_{13ef} = \sqrt{3} \cdot I_{3ef} \quad (\text{V}) \quad [2.77]$$

I_{12ef} , I_{23ef} , I_{13ef} : efektívne hodnoty združených prúdov medzi krajnými vodičmi 1 a 2, 2 a 3, 1 a 3 (A)

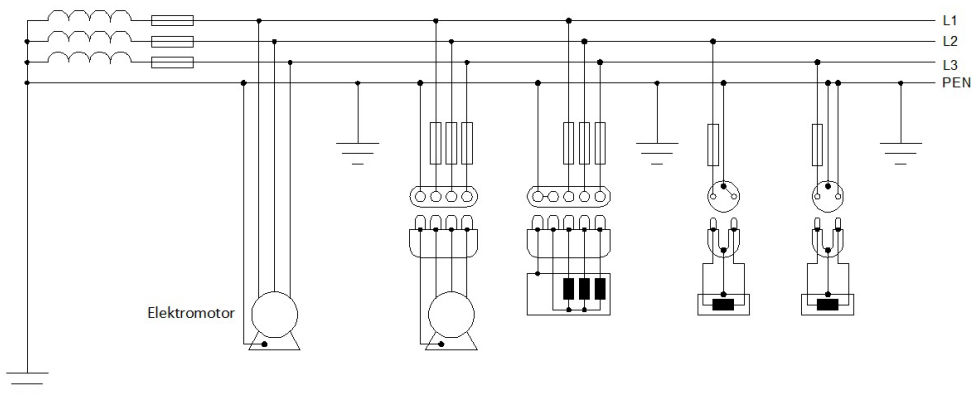
V súčasnosti sa v Slovenskej republike a väčšine štátov Európskej únie vyžaduje pre domácnosti a ostatné občianske stavby elektrická sieť TN – C – S. V starších stavbách sa stále môžeme stretnúť so sieťou TN – C. Zjednodušené schémy sietí TN – C – S a TN – C od sekundárnej časti distribučného transformátora z 22 kV na 0,4 kV sú znázornené na obr. 2-13 a 2-14. Efektívne fázové napätie za týmto distribučným transformátorom (napätia medzi jedným z vodičov L1, L2 alebo L3 a neutrálnym vodičom N na obr. 2-13

alebo kombinovaným ochranným a neutrálnym vodičom 2-14) je v podmienkach Slovenskej republiky a takmer všetkých štátov Európskej únie (okrem Spojeného kráľovstva Veľkej Británie a Severného Írska) 230 V a efektívne združené napätie (napätie medzi ľubovoľnými dvomi krajnými vodičmi L1, L2 a L3 na obr. 2.13 alebo 2.14) je 400 V. Sieťová frekvencia tohto napätia a prúdu je 50 Hz.



L1, L2 a L3: krajné vodiče, N: neutrálny vodič, PE: ochranný vodič.

Obrázok 2-13 Rozvodná sieť TN - C - S (Meravý 2011, upravené)



L1, L2 a L3: krajné vodiče, PEN: kombinovaný ochranný a neutrálny vodič.

Obrázok 2-14 Rozvodná sieť TN - C (Meravý 2011, upravené)

Podrobné informácie o rozvodných sieťach a bezpečnosti elektrických zariadení z hľadiska ochrany pred úrazom elektrickým prúdom uvádza napr. Meravý (2011).

Pred popisom poruchových stavov, ktoré môžu spôsobiť požiar je potrebné ešte uviesť definíciu elektroinštalácie. Elektroinštaláciou sa v zmysle vyhl. MPSVaR č. 508/2009 Z. z. rozumie zostava vzájomne spolupracujúcich elektrických zariadení s koordinovanými vlastnosťami, ktoré slúžia na plnenie určitých cieľov.

Vzhľadom na rozsiahlosť problematiky budú ďalšie časti tejto podkapitoly zamerané len na TN siete.

2.3.3.1. Elektrický skrat

Elektrický skrat je poruchový stav, ktorý nastane vodivým spojením (s dostatočne nízkou hodnotou elektrického odporu) častí elektroinštalácie s rozdielnym potenciálom (elektrickým napätím). Podľa hodnoty impedancie (v zjednodušených prípadoch elektrického odporu) v mieste skratového spojenia sa skraty delia na **dokonalé** a **nedokonalé**. Dokonalý skrat nastane v prípade ak je impedancia zanedbateľná (spojenie vodičov). Pri nedokonalom skrate má impedancia skratového spojenia (nezanedbateľnú) hodnotu, ktorá obmedzuje veľkosť skratového prúdu z čoho vyplýva, že skratový prúd bude nižší. Podľa počtu skratovaných fáz sa skraty delia na:

- **skraty súmerné** (*trojfázový skrat* – vodivé spojenie všetkých krajných vodičov L1, L2 a L3),
- **skraty nesúmerné** (*jednofázový skrat* – spojenie jedného krajného vodiča L1, L2 alebo L3 so zemou, neutrálnym vodičom N, ochranným vodičom PE alebo kombinovaným vodičom PEN, *dvojfázový skrat* – spojenie dvoch krajných vodičov a *dvojfázový zemný skrat* – spojenie dvoch krajných vodičov so zemou alebo vodičom N, PE alebo PEN).

Pred vysvetlením mechanizmu, akým môže elektrický skrat, zvýšený prechodový odpor alebo preťaženie spôsobiť požiar je potrebné popísať teplotné podmienky za bežných prevádzkových podmienok a počas skratu.

Pri prechode striedavého elektrického prúdu elektrickým vodičom jednotkovej dĺžky, sa tento zahrieva Jouleovým stratovým výkonom, ktorý závisí od hustoty elektrického prúdu, merného elektrického odporu vodiča a jeho prierezu podľa rovnice [2.78]. Hustota striedavého prúdu vo vodiči nie je rovnomerná, ale sa zvyšuje od jeho stredu smerom k povrchu, preto v rovnici [2.78] uvažujeme s prúdovou hustotou v elementárnej ploche dA (Dvořák a kol. 2011a).

$$P_{AC} = \int_0^S j^2 \cdot \rho \cdot dA \quad [W] \quad [2.78]$$

P_{AC} : Jouleov stratový výkon (W)

j : hustota elektrického prúdu ($A \cdot m^{-2}$)

ρ : merný elektrický odpor vodiča ($\Omega \cdot m^{-1}$)

A : prierez vodiča (m^2)

Zvyšovanie hustoty elektrického prúdu od stredu vodiča k jeho povrchu narastá s narastajúcou frekvenciou a klesá s narastajúcim jednosmerným odporom vodiča. Pri sieťovej frekvencii 50 Hz je zanedbateľný, preto po substitúcii, kde R (Ω) je odpor elektrického vodiča dĺžky l (m) môžeme rovnicu [2.78] prepísať do tvaru [2.79].

$$P_{AC} = R \cdot I^2 \quad (W) \quad [2.79]$$

Jouleov stratový výkon, ktorý sa v jednotkovej dĺžke vodiča premení na teplo sa teda rovná súčinu elektrického odporu vodiča a druhej mocniny prúdu, ktorý ním preteká. Odpor vodiča nie je konštantná veličina, ale jej hodnota závisí od teploty podľa rovnice [2.80].

$$R_t = R_z \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (\Omega) \quad [2.80]$$

R_t : elektrický odpor vodiča pri teplote $(t + \Delta t)$ (Ω)

R_z : elektrický odpor vodiča pri referenčnej teplote (t) (Ω)

α : teplotný koeficient odporu ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Δt : rozdiel medzi teplotou vodiča a referenčnou teplotou ($^{\circ}\text{C}$)

Teplotný koeficient odporu má pre väčšinu materiálov (s výnimkou polovodičov) kladnú hodnotu, tzn. elektrický odpor vodičov (vrátane medi, hliníka a ocele) narastá so zvyšujúcou sa teplotou.

Pri skrate sa vodič, rovnako ako za normálnych prevádzkových podmienok, zahrieva Jouleovým stratovým výkonom. Rozdiel oproti normálnemu prevádzkovému stavu je v hodnote elektrického prúdu tečúceho obvodom. Elektrický prúd tečúci vodičom pri skrate je rádovo vyšší ako nominálny prúd. Podľa Ohmovho zákona [2.49] sa rovná podielu rozdielu potenciálov (efektívneho fázového alebo združeného napätia – v závislosti od druhu skratu) a elektrického odporu. Elektrický odpor v skratovom obvode závisí od súčtu odporu vodiča (závisí od jeho dĺžky, prierezu a merného elektrického odporu) a prechodového odporu v mieste vzniku skratu, ktorý sa počíta podľa rovnice [2.81].

$$R_c = \frac{\rho_c \cdot l_c}{A_c} \quad (\Omega) \quad [2.81]$$

R_c : prechodový odpor v mieste vzniku skratu (Ω)

ρ_c : merný elektrický odpor stykovej plochy medzi vodičmi ($\Omega \cdot \text{m}^{-1}$)

l_c : hrúbka stykovej vrstvy (m)

A_c : plocha stykovej vrstvy (m^2)

Miesto styku je v prípade medených vodičov pokryté oxidom meďným, preto ako mernú elektrickú vodivosť je potrebné dosadiť mernú elektrickú vodivosť oxidu meďného a hrúbka stykovej vrstvy jeho hrúbku v okamihu vzniku skratu. Plocha styku závisí od priemeru vodičov, spôsobu ich vzájomnej orientácie a prítláčnej sily v okamihu dotyku. V prípade sekundárneho skratu je potrebné počítať aj s určitou vrstvou termicky degradovanej izolácie. Pri elektrickom skrate dochádza k uvoľneniu veľkého množstva tepla, ktoré spôsobí roztavenie vodičov v stykovej vrstve, následkom čoho sa plocha styku zväčšuje. Okrem toho následkom tavenia vodičov v stykovej vrstve je možné zanedbať merný elektrický odpor oxidu meďného.

V prípade reálneho skratu obyčajne nepoznáme hrúbku stykovej vrstvy ani plochu styku, nakoľko táto nezávisí len od priemeru a vzájomnej orientácie vodičov, ale aj od drsnosti vodičov a prítláčnej sily a navyše vplyvom tavenia vodičov sa mení s časom. Rovnica [2.80] má preto skôr ilustračný charakter.

V prípade vzniku skratu bude celým obvodom tiecť rovnaký prúd, ale elektrický odpor nebude v celom obvode rovnaký. Pre Jouleove straty v mieste vzniku skratu bude platiť rovnica [2.82]. Preto najviac tepla bude za skratového stavu uvoľnené v mieste vzniku skratu.

$$P_{Acc} = (R + R_c) \cdot I^2 \quad (\text{W}) \quad [2.82]$$

P_{Acc} : Jouleov stratový výkon v mieste vzniku skratu (W)

Pri dokonalých skratoch tečú obvodom veľmi vysoké prúdy, ktoré sú limitované celkovou impedanciou (odporom) v skratovom obvode. Za predpokladu funkčného istiaceho prístroja (poistka alebo istič) najbližšie k miestu vzniku skratu, skratový prúd nebude tiecť dlhšie ako 0,4 s (platí pre fázové napätie 230 V a združené napätie 400 V).

Rovnica [2.81] platí presne v okamihu vzniku skratu. Následkom skratu však vo veľmi krátkom čase dochádza vplyvom Jouleovho stratového výkonu k vývinu extrémne vysokého množstva tepla (v porovnaní s množstvom tepla uvoľneného na jednotku dĺžky vodiča počas prevádzky za nominálnych podmienok), ktoré zapríčini lokálne prehriatie a následné roztavenie vodičov v mieste vzniku skratu. To má za následok jednak nárast merného elektrického odporu vplyvom jeho teplotnej závislosti podľa rovnice [2.83], ako aj zväčšenie stykovej plochy vplyvom lokálneho roztavenia v mieste styku.

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (\Omega \cdot m) \quad [2.83]$$

R_t : merný elektrický odpor pri teplote $(t + \Delta t)$ ($\Omega \cdot m$)

R_0 : merný elektrický odpor pri referenčnej teplote (t) ($\Omega \cdot m$)

α : teplotný koeficient merného elektrického odporu ($^{\circ}C^{-1}$)

Δt : nárast teploty vodiča oproti referenčnej teplote ($^{\circ}C$)

Pri zanedbaní vrstvy Cu_2O na povrchu vodičov, je možné Jouleov stratový výkon v mieste styku vodičov vypočítať podľa rovnice [2.78], kde za prúdovú hustotu bude dosadený pomer skratového prúdu k ploche styku vodičov v mieste skratu a za merný elektrický odpor bude dosadená jeho integrovaná hodnota od teploty okolia vodiča pred vznikom skratu po teplotu v mieste skratu v okamihu prerušenia obvodu istiacim prístrojom podľa rovnice [2.84].

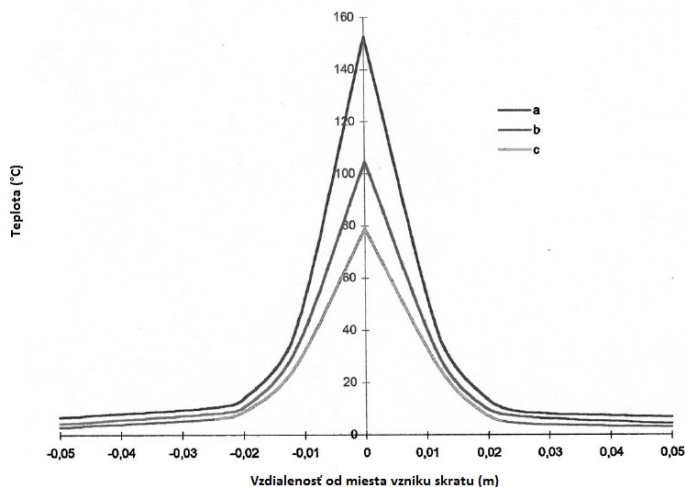
$$R = \int_{t_a}^{t_f} R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) dt \quad (\Omega \cdot m) \quad [2.84]$$

t_a : teplota vodiča pred vznikom skratu ($^{\circ}C$)

t_f : teplota v mieste vzniku skratu v okamihu prerušenia obvodu istiacim prístrojom ($^{\circ}C$)

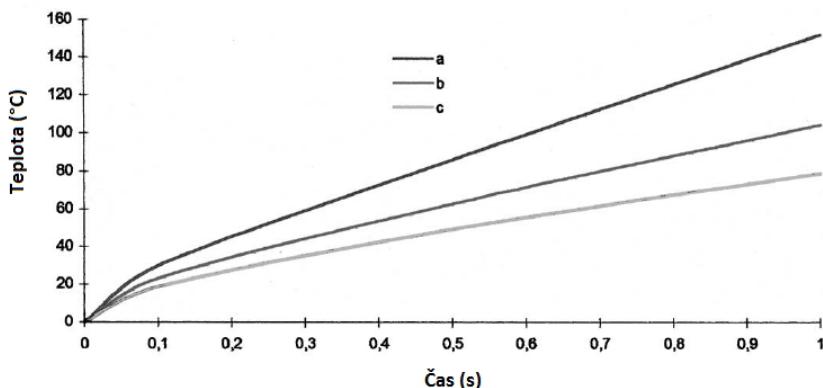
Teplota v čase skratu od miesta styku vodičov (skratu) prudko klesá. Obrázok 2-15, ilustruje teplotný priebeh v medených vodičoch s prierezmi (200, 250 a 300) mm^2 pri ich zaťažení skratovým prúdom 7,2 kA počas jednej sekundy. Z uvedeného obrázka jasne vyplýva rýchly pokles teploty od miesta vzniku skratu. Na obr. 2-16 je znázornený nárast teploty v mieste skratu od času jeho trvania. Teploty na obr. 2-15

a 2-16 vo vzdialenosti 0 m od miesta skratu boli merané na odvrátenej strane (z pohľadu prierezu) od strany na ktorej vznikol skrat pomocou laboratórneho zdroja prúdu za laboratórnych podmienok. Teplota presne v mieste skratu nebola meraná. Za reálnych podmienok (v sieťach TN pri súmerných aj nesúmerných skratoch) dochádza v mieste



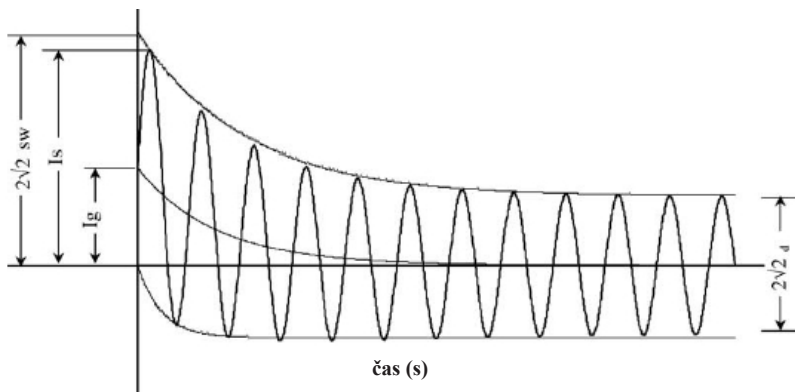
Obrázok 2-15 Distribúcia teplôt v medených vodičoch s prierezom a) 200 mm^2 , b) 250 mm^2 a c) 300 mm^2 pri ich zaťažení skratovým prúdom 7,2 kA ako funkcia vzdialenosti od miesta skratu (doba trvania skratu 1 s) (Filippakou 2001)

skratu medených a hliníkových vodičov k ich roztaveniu. Z uvedeného vyplýva, že teplota v mieste skratu medeného vodiča dosahuje hodnotu minimálne 1084,5 °C (teplota tavenia podľa Vohlídala a kol. 1999) a maximálne 2567° (teplota varu podľa Vohlídala a kol. 1999). V mieste skratu hliníkových vodičov sa dosahuje teplota minimálne 660,37 °C (teplota tavenia podľa Vohlídala a kol. 1999) a maximálne 2467 °C (teplota varu podľa Vohlídala a kol. 1999).



Obrázok 2-16 Nárast teplôt pod miestom skratu v medených vodičoch s prierezom a) 200 mm², b) 250 mm² a 300 mm² pri ich zatažení skratovým prúdom 7,2 kA (Filippakou 2001)

Ilustračný priebeh skratového prúdu je znázornený na obr. 2-17.



I_g : prúd tečúci v obvode tesne pred vznikom skratu (A)

Obrázok 2-17 Ilustračný priebeh skratového prúdu (Polykrati a kol. 2004)

Napriek vysokej hodnote uvoľneného tepla a vysokej teplote v mieste skratu, ktorá sa počas skratu uvoľní v TN sieťach s fázovým napätím 230 V a združeným napätím 400 V je pri vzniku dokonalého skratu relatívne nízka pravdepodobnosť vzniku požiaru. Dôvodom je, že pri vzniku dokonalého skratu v týchto sieťach pri uvedených napätových hladinách s veľmi vysokou pravdepodobnosťou istiaci prístroj (istič alebo poisťka) preruší obvod do 0,4 s. Dokonca pri zlyhaní istiaceho prístroja najbližšie k miestu vzniku skratu by vo veľmi krátkom časovom intervale reagovali ďalšie istiace prvky (hlavný istič a v prípade jeho zlyhania poisťka v prípojčkovej skrini). Dokonalý skrat v prípade správnej funkcie prvého istiaceho prístroja a dokonca aj v prípade jeho zlyhania a správnej funkcie nasledujúceho

istiaceho prístroja vo väčšine prípadov dokáže iniciovať len horľavý súbor tvorený zmesou horľavého plynu alebo pary horľavej kvapaliny so vzduchom alebo zmesou rozvíreného horľavého prachu so vzduchom. Okrem toho však nemožno vylúčiť ani iniciáciu látok s veľkým merným povrchom (napr. seno, slama, prach a perie).

Iný prípad je dokonalý skrat v časti elektrického obvodu istenej len jedným istiacim prístrojom. Príkladom sú napr. automobily. V takomto prípade ak dôjde k znefunkčneniu istiaceho prístroja (napr. nahradením tavného vodiča vo vnútri poistky vodičom s väčším prierezom), tak skrat môže trvať dostatočne dlhý čas na to, aby inicioval materiály nachádzajúce sa v jeho blízkosti (napr. izoláciu v okolí skratu).

Nedokonalý skrat môže, ale nemusí byť účinnejším iniciačným zdrojom ako skrat dokonalý. Potenciálna účinnosť nedokonalého skratu ako iniciátora požiaru je determinovaná veľkosťou skratového prúdu, typom ističa a jeho nominálnym vypínacím prúdom. Istič je istiaci prístroj, ktorý istí elektrické zariadenia pri zvýšení prúdu nad menovitú hodnotu. Istič istí elektrické zariadenia pred prúdovým preťažením (zvýšenie prúdu nad menovitú hodnotu, ktoré nemá charakter skratového prúdu) a skratovým prúdom (rýchle mnohonásobné zvýšenie prúdu nad menovitú hodnotu). Istič obsahuje tepelnú spúšť a elektromagnetickú spúšť. Tepelná spúšť odpája chránený obvod od zdroja elektrického prúdu pri preťažení a elektromagnetická spúšť pri skrate. Elektromagnetická spúšť reaguje za podstatne kratší čas ako spúšť tepelná (v TN sieťach s fázovým napätím 230 V musí elektromagnetická spúšť reagovať do 0,4 s).

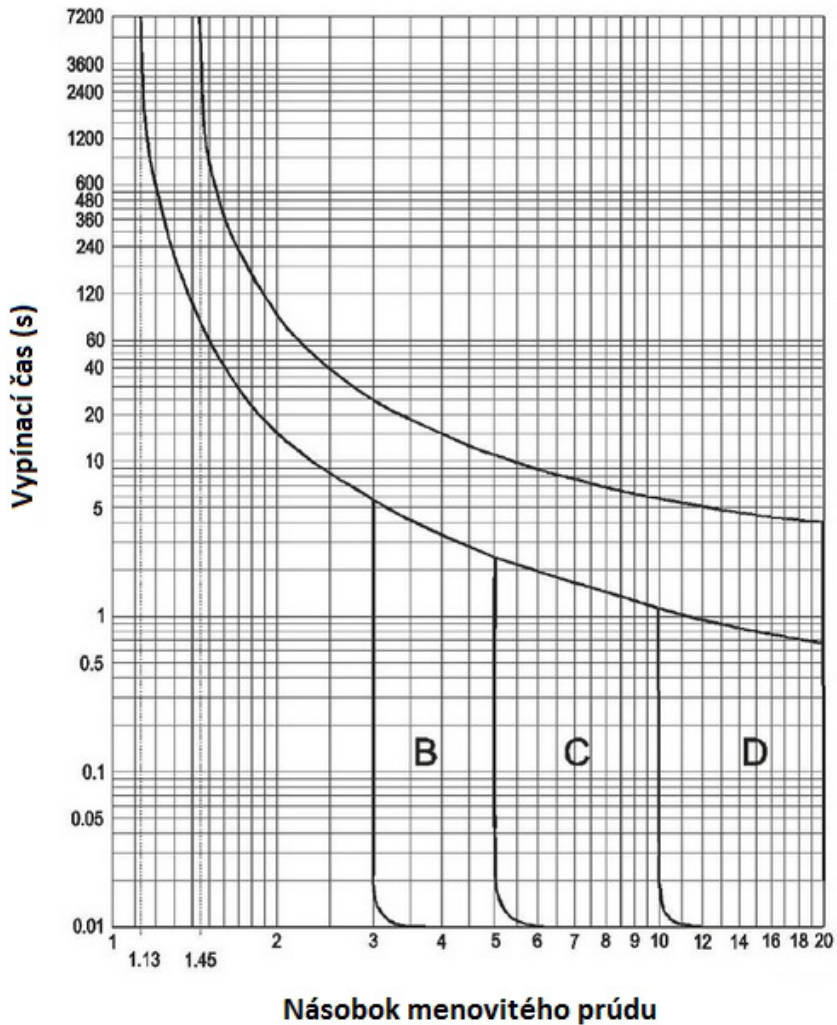
V domových rozvodoch sa bežne používajú ističe s charakteristikou B. Skratová spúšť ističov B začína reagovať, ak prúd dosiahne hodnotu 3 až 5 násobku nominálnej hodnoty. Pri nižších hodnotách prekročenia prúdu reaguje tepelná spúšť.

V prípade vzniku nedokonalého skratu, ktorého hodnota nedosahuje 3 až 5 násobnú hodnotu nominálneho prúdu teda nebude reagovať elektromagnetická, ale len tepelná spúšť. V prípade ističa s charakteristikou B by pri 2 násobnom prekročení menovitého prúdu trvalo odpojenie obvodu desiatky až stovky sekúnd.

Z uvedeného vyplýva, že aj keď pri nedokonalom skrate tečú nižšie prúdy, ak tieto nedosahujú hodnotu pri ktorej začína reagovať skratová spúšť ističa, tieto trvajú podstatne dlhšie, ako skraty dokonalé. Potenciálna účinnosť skratu ako iniciátora požiaru narastá s narastajúcim časom jeho trvania. Na tomto mieste je však potrebné zdôrazniť, že nedokonalý skrat trvá dlhšie (a preto je aj účinnejší) len v tom prípade, že nedosahuje hodnotu, pri ktorej reaguje elektromagnetická spúšť ističa.

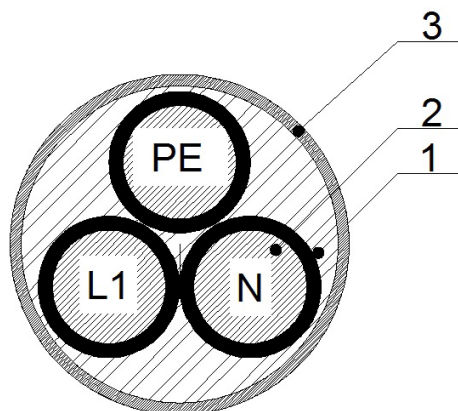
Príklad vypínacej charakteristiky ističa B, C a D je znázornený na obr. 2-18.

Nedokonalý skrat môže vzniknúť napr. medzi jadrami vodičov (s rozdielnym potenciálom) vo vnútri kábla, následkom zníženia izolačného odporu izolácií jadier (za predpokladu, že odpor bude znížený na hodnotu pri ktorej vznikne nedokonalý skrat). Zníženie izolačného odporu môže byť spôsobené napr. termickým namáhaním alebo mechanickým poškodením. Termické zaťaženie môže mať krátkodobý alebo dlhodobý charakter. Pri krátkodobom zaťažení kábla vysokou teplotou alebo vysokou hustotou tepelného toku) dôjde k rýchlemu poklesu izolačného odporu následkom termickej degradácie izolácie medzi jadrami vodičov. Pri dlhodobom zaťažení kábla relatívne nízkou teplotou (ktorá je ale vyššia ako bežná prevádzková teplota) dochádza k zrýchlenému starnutiu izolácie a následnému pozvoľnému poklesu izolačného odporu. Skratový prúd v prípade takýchto nedokonalých skratov môže vykazovať nižšie hodnoty ako hodnoty potrebné na reakciu elektromagnetickej spúšte ističov. Takýto skratový prúd však môže postačovať na vytvorenie elektrického oblúka.



Obrázok 2-18 Vypínacia charakteristika ističov B, C a D spĺňajúcich požiadavky EN 60 898-1:2003 (Miniature Circuit Breaker 2013)

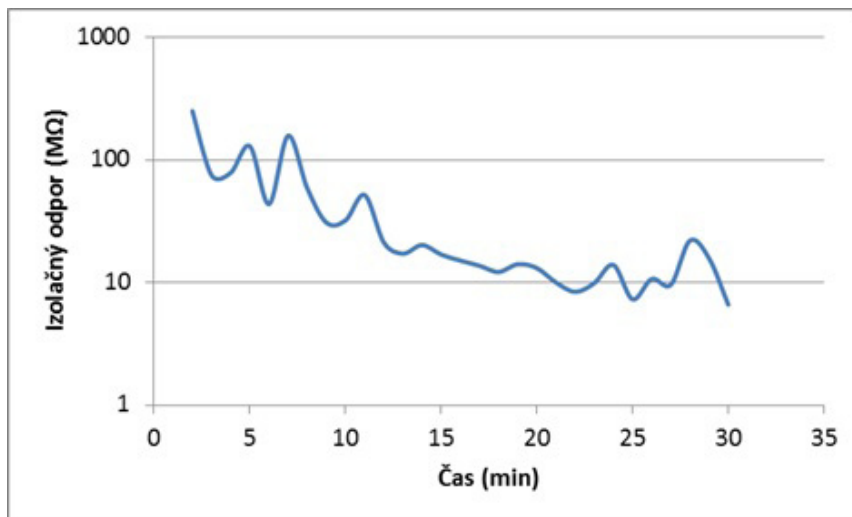
Rez káblom, ktorý pozostáva z vodičov L1, N a PE je znázornený na obr. 2.19. Ku skratu v tomto kábli môže dôjsť následkom poklesu izolačného odporu medzi izoláciou jadra vodiča L1 a izoláciou jadra vodiča N alebo PE.



1: izolácia jadra vodiča, 2: jadro vodiča, 3: plášť (vonkajšia izolácia) kábla

Obrázok 2-19 Rez trojžilovým káblom

Závislosť izolačného odporu trojžilového kábla s plnými medenými jadrami s prierezom 2,5 mm a PVC izoláciou zaťaženého vzduchom s teplotou 450 °C a prietokom 10 l.s⁻¹ je znázornená na obr. 2-20. Izolačný odpor bol meraný medzi vodičom L a PE. Kábel bol počas skúšky orientovaný vertikálne.



Obrázok 2-20 Časová závislosť izolačného odporu trojžilového PVC kábla zaťaženého vzduchom s teplotou 450 °C (Martinka a kol. 2014a)

Pri interpretácii údajov na obr. 2-20 je však potrebné brať do úvahy, že kábel nebol pripojený do elektrického obvodu. V prípade, že by bol kábel zaťažený prenosom elektrického výkonu narastal by jeho elektrický odpor podľa rovnice [2.80] a vznikali by v ňom Jouleove straty, ktoré by spôsobovali jeho zahrievanie z vnútra, čím by prispievali k termickej degradácii izolácie jadier. Okrem toho s klesajúcim izolačným odporom by

narastal zvodový prúd medzi vodičmi L a N, ako aj medzi vodičmi L a PE. Prietokom tohto prúdu by sa vodiče zahrievali Jouleovým stratovým výkonom podľa rovnice [2.79].

Pokles izolačného odpor v skúmanom PVC kábli bol spôsobený reverzibilnými (vrátnymi) zmenami, nakoľko izolačný odpor po 1 minúte od ukončenia skúšky (zaťaženia vodiča tepelnou konvekciou) nadobudol pôvodnú hodnotu, resp. hodnotu vyššiu, ako horný rozsah použitého meracieho prístroja (1000 M Ω).

2.3.3.2.

Zvýšený prechodový odpor a preťaženie

Zvýšený prechodový odpor je po nesprávnej inštalácii elektrického zariadenia najčastejšou príčinou vzniku požiaru spôsobeného tepelnými prejavmi elektrického prúdu. Zvýšený prechodový odpor, aj preťaženie ako príčina vzniku požiaru súvisia s Jouleovým stratovým výkonom (rovnica [2.79]) a nárastom elektrického odporu väčšiny elektrických vodičov (okrem polovodičov) s narastajúcou teplotou (rovnica [2.80]).

Každá časť elektroinštalácie ktorou preteká elektrický prúd (živá časť) sa ohrieva Jouleovým stratovým výkonom podľa rovnice [2.79]. Ak je elektrická inštalácia navrhnutá, vyrobená a prevádzkovaná v súlade s platnými právnymi a technickými predpismi, je možnosť odvodu tepla z nej vyššia ako teplo uvoľnené následkom prietoku elektrického prúdu a nebezpečenstvo iníciaie požiaru teda nehrozí.

Ak dôjde k nárastu odporu na trase elektrického prúdu, zvýši sa podľa rovnice [2.79] Jouleov stratový výkon. Ak takto uvoľnené teplo bude vyššie ako množstvo tepla, ktoré môže byť z tejto časti odvádzané začne v mieste nárastu odporu narastať teplota. Nárast teploty sa prejaví zvýšením elektrického odporu podľa rovnice [2.80] a ten následne spôsobí nárast Jouleových strát. Uvedený mechanizmus môže spôsobiť významný nárast teploty v mieste nárastu odporu, ktoré následne bude predstavovať účinný iníciačný zdroj.

Nárast elektrického odporu na trase elektrického prúdu môže mať viac príčin. Medzi najčastejšie patrí zmenšenie prierezu vodiča (napr. mechanickým poškodením), jeho nedostatočný kontakt s inými živými časťami (napr. v mieste uchytenia v svorkovnici, spínači alebo vypínači) alebo zoxidovaný povrch v mieste kontaktu. Nedostatočný kontakt v svorkovnici, spínači alebo vypínači môže byť spôsobený buď nedostatočným pritiahnutím spojovej skrutky alebo tečením vodiča (k tečeniu má podstatne vyšší sklon hliník ako meď). Zvýšenie elektrického odporu v bode z vyššie uvedených príčin sa nazýva zvýšený prechodový odpor.

Okrem zvýšeného prechodového odporu, ktorý má výrazne lokálny charakter, môže dôjsť k zvýšeniu elektrického odporu v podstatne väčšej časti elektroinštalácie následkom nárastu teploty okolia alebo následkom zhoršenia podmienok odvodu tepla z elektroinštalácie. Špecifickým prípadom je zhoršenie odvodu tepla z elektrických spotrebičov, ktorý je popísaný v podkapitole 2.3.3.5. Teplota okolia sa môže zvýšiť buď od externého zdroja tepla (ktorý nesúvisí s elektroinštaláciou), zvýšením prúdového zaťaženia (preťaženie) alebo od tepla z Jouleovho stratového výkonu. Zvýšenie teploty okolia a následný nárast elektrického odporu elektroinštalácie (najmä elektrických káblov) vedie k nárastu Jouleovhu stratového výkonu a následnému prehrievaniu elektroinštalácie. Výsledok môže byť od zrýchleného starnutia izolácie s pozvoľným poklesom izolačného odporu medzi vodičmi s rôznym potenciálom (môže vyústiť až do skratu) až po rýchly termický rozklad izolácie a následný skrat.

Preťaženie (zvýšenie prúdového zaťaženia nad menovitú hodnotu, ktoré nemá charakter skratového prúdu) môže vzniknúť buď následkom poruchy elektrického zariadenia alebo pripojením na elektrické vedenie (elektrický kábel) spotrebiča alebo spotrebičov s vyšším nominálnym prúdom na aké je toto vedenie (elektrický kábel) nadimenzované. Na tomto mieste je potrebné upozorniť, že nie je možné uviesť jednoduchú tabuľku uvádzajúcu hodnoty maximálneho zaťaženia kábla v závislosti od prierezu jeho vodičov. Dôvodom je skutočnosť, že káble v domácnostiach (a prakticky všetkých občianskych stavbách) sa dimenzujú tak aby splnili požiadavky na úbytok napätia a dovolené oteplenie (Jouleovým stratovým výkonom). S ohľadom na splnenie požiadaviek maximálneho úbytku napätia narastá minimálny prierez žíl kábla s jeho narastajúcou dĺžkou. S ohľadom na splnenie požiadaviek na maximálne dovolené oteplenie kábla narastá minimálny prierez žíl kábla so zhoršujúcimi sa podmienkami odvodu tepla (napr. kábel vedený pod anorganickou omietkou v stene z pálenej tehly má vyššiu možnosť odvodu tepla, ako ten istý kábel s rovnakým prúdovým zaťažením vedený v izolačnom materiáli).

Na prvý pohľad môže z rovnice [2.79] vyplývať, že preťaženie z hľadiska iniciácie požiaru predstavuje vyššie riziko ako zvýšený prechodový odpor (prúd je v rovnici [2.79] umocnený na druhú) nakoľko Jouleove straty sú úmerné pretekajúcemu prúdu umocnenému na druhú (rovnica [2.79]). Tento záver ale nie je celkom korektný. Dôvodom je, že pred preťažením je elektroinštalácia chránená istiacim prístrojom (v sieti TN s fázovým napätím musí teplotná spúšť ističa reagovať pri prietoku prúdu 1,45 krát vyššieho ako je nominálny do jednej hodiny), ale pred zvýšeným prechodovým odporom nechráni elektrickú inštaláciu žiadny istiaci prístroj. Zvýšený prechodový odpor môže byť odhalený napr. počas odbornej prehliadky alebo skúšky, prípadne ak spôsobí poruchu elektroinštalácie.

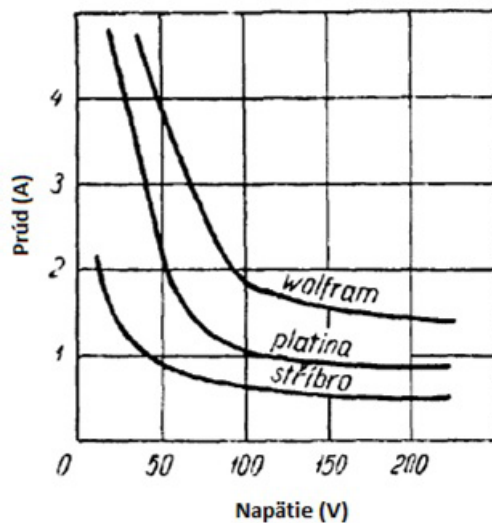
2.3.3.3.

Elektrický oblúk a elektrická iskra

NFPA 921:2014 definuje oblúk ako vysokoteplotný svietiaci elektrický výboj cez medzeru alebo látku (napr. zuhoľnatená izolácia). Elektrický oblúk vzniká medzi dvomi vodivými látkami (elektrodami) s rozdielnym potenciálom (napätím) pri splnení určitých (kritických) podmienok. Podmienky pre vznik a udržanie oblúku sú dané predovšetkým vzdialenosťou medzi elektrodami, druhom a povrchovou úpravou materiálu elektród, druhom a veľkosťou elektrického napätia a prúdu (tečúcim cez spojené elektródy). Okrem uvedených parametrov má na vznik oblúku vplyv množstvo ďalších faktorov, ako napr. teplota povrchu elektród, vlhkosť vzduchu alebo materiálu cez ktorý vzniká oblúk a pri striedavých oblúkoch je veľmi významným parametrom frekvencia elektrického prúdu.

Elektrický oblúk je priestorovo zreteľne ohraničený jasne svietiaci útvar približne kruhového prierezu s priemerom 1 až 10 mm. Vo všeobecnosti sa rozlišujú oblúky jednosmerné (DC) a striedavé (AC). Jednosmerný oblúk sa relatívne ľahko zapáľuje a po zapálení horí stabilne. Na začiatku zapáľovacieho procesu (resp. pred ním) je nutné, aby elektródy mali krátkodobý kontakt (spojenie nakrátko). Spojenie nakrátko spôsobí ohriatie elektród a uľahčí zapálenie oblúku pri následnom oddialení elektród. Striedavý oblúk sa zapáľuje rovnakým postupom (alebo mechanizmom pri spontánných oblúkoch) ale udržuje sa v porovnaní s jednosmerným oblúkom náročnejšie. Dôvodom je skutočnosť, že striedavý oblúk sa v každej polo-perióde zhasne a opätovne zapáli (Dvořák a kol. 2011a).

Pri určitom napätí na kontaktoch je ich možné rozpojiť bez vzniku oblúka len do určitého (medzného) prúdu. Medzný prúd nemá konštantnú hodnotu, ale závisí (hlavne u náhodných kontaktov) od kvality povrchu, tvaru a teploty kontaktov. Závislosť medzného prúdu od napätia pre vybrané materiály kontaktov je znázornená v tabuľke 2-11. Hodnota medzného prúdu narastá s klesajúcim napätím. Minimálne napätie, pri ktorom môže byť elektrický oblúk udržaný sa nazýva najmenšie napätie oblúka. Jeho veľkosť sa pre väčšinu slaboprúdových kontaktov pohybuje od 12 do 20 V. Medzné krivky elektrického oblúku pre vybrané materiály ilustruje obr. 2-21 (Dvořák a kol. 2011a).



Obrázok 2-21 Medzné krivky elektrického oblúka pre vybrané materiály (Dvořák a kol. 2011a)

Tabuľka 2-11 Medzný prúd pre udržanie oblúka

Napätie (V)	Medzný prúd (A)			
	Ag	Cu	W	C
24	1,7	–	12,5	–
50	1,0	3,0	4,0	5,0
110	0,6	1,3	1,8	0,7
220	0,45	0,5	1,4	0,1

Prameň: Dvořák a kol. (2011a)

Elektrický oblúk môže podľa Dvořáka a kol. (2011a) a NFPA 921:2014 dosahovať teploty rádovo tisícky stupňov Celzia. Teplota však nie je v celom objeme oblúka konštantná.

Napriek uvedeným vysokým teplotám nepatrí elektrický oblúk medzi najúčinnnejšie iničiačné zdroje. Elektrický oblúk vykazuje vysokú účinnosť pri iničiácii horľavého súboru tvoreného zmesou horľavého plynu alebo pary so vzduchom. Pravdepodobnosť iničiácie horľavého súboru tvoreného zmesou rozvíreného horľavého prachu so vzduchom je už nižšia. Elektrický oblúk dokáže rovnako za určitých okolností (s nižšou pravdepodobnosťou ako rozvírený horľavý prach) iničiovat aj usadený prach a vlákňité látky s vysokým pomerom ich merného povrchu k objemu a nízkym koeficientom tepelnej vodivosti (napr.

seno, slama a pod.). Od iniciácie elektrickým oblúkom je potrebné odlišiť iniciáciu od povrchu elektród. Elektródy sa môžu od elektrického oblúka ohrievať na vysoké teploty, pričom iniciácia látky od povrchu elektródy je podobná iniciácii od horúceho povrchu. Elektrický oblúk môže vzniknúť (NFPA 921:2014):

- pri prerušení obvodu (napr. v spínači alebo vo vypínači) cez ktorý tečie elektrický prúd,
- medzi vodičmi (elektródami) oddelenými izolantom (prieraz dielektrika),
- vytváraním vodivých ciest na povrchu nevodivého materiálu.

Okrem uvedených mechanizmov uvádza NFPA 921:2014 vysokonapäťové oblúky a statickú elektrinu. Statickej elektrine je venovaná nasledujúca podkapitola 2.3.3.4. Podľa NFPA 921:2014 sa vysoké napätie do siete bežného domového rozvodu môže dostať náhodným kontaktom s vedením distribučnej sústavy. V tomto prípade sa môže vytvoriť oblúk pri prerušení obvodu v zariadení (napr. spínač alebo vypínač), ktoré je nadimenzované tak aby v ňom nedochádzalo k vytvoreniu elektrického oblúka pri prerušení obvodu s nízkym napätím, ale voči vzniku oblúka pri vysokom napätí nie je toto zariadenie odolné. Na tomto mieste je však potrebné upozorniť, že vysoké napätie môže byť do nízkonapäťového rozvodu naindukované elektromagnetickou indukciou (vodivé spojenie s vysokonapäťovou sieťou nie je nutnou podmienkou výskytu vysokého napätia v nízkonapäťovej sieti).

K naindukovaniu vysokého napätia do elektroinštalácie môže dôjsť napr. pri súbehu vodičov nízkeho a vysokého napätia alebo údere blesku. Súbeh vodičov nízkeho a vysokého napätia je riešený v technických normách týkajúcich sa elektrotechniky. Indukcia elektrického napätia z vodičov vysokého napätia do vodičov nízkeho napätia okrem rizika vzniku požiaru predstavuje vysoké riziko poškodenia častí elektroinštalácie a úrazu elektrickým prúdom. Blesk je formou statickej elektriny (atmosférická statická elektrina), ktorej je venovaná bližšia pozornosť v nasledujúcej podkapitole 2.3.3.4.

Príkladom elektrického oblúka pri prerušení obvodu, ktorým tečie prúd, je vypnutie vypínača (oblúk vzniká medzi kontaktmi) a vytiahnutie zástrčky zo zásuvky. Elektrický oblúk môže okrem toho vzniknúť na kefách komutátora. Ďalším typickým príkladom elektrického oblúka je oblúkové zváranie. Elektrický oblúk môže vzniknúť pri skrate, kedy skratový prúd spôsobí roztavenie vodiča v mieste kontaktu a cez takto vzniknutú medzeru preskočí elektrický oblúk (NFPA 921:2014). V poslednom prípade môže účinný iniciačný zdroj predstavovať aj roztavený kov.

Elektrický oblúk medzi dvomi vodičmi (elektródami) oddelenými izolantom môže vzniknúť pri priereze tohto izolantu (napr. medzi vodičom L1 a PE na obr. 2-19). K prierezu izolantu môže dôjsť buď následkom prekročenia elektrickej pevnosti izolácie (elektrický prieraz) alebo prekročením kritickej teploty izolácie (tepelný prieraz). Oba mechanizmy prierezu elektrickej izolácie sú spojené s jej uhoľnatením (karbonizáciou) a vytvorený oblúk sa nazýva oblúk cez zuhoľnatenú vrstvu (NFPA 921:2014).

Na povrchu nevodivého materiálu môže vzniknúť elektrický oblúk vytváraním nevodivých ciest, ak je tento kontaminovaný soľami, vodivým prachom alebo kvapalinou (NFPA 921:2014).

Vo všeobecnosti poznáme elektrické iskry indukčné, kapacitné a elektrostatické. Tieto iskry dokážu účinne iniciovať horľavý súbor tvorený horľavým plynom alebo parou horľavej kvapaliny s oxidačným prostriedkom (najčastejšie vzduchom). S nižšou pravdepodobnosťou môžu iniciovať aj rozvírený horľavý prach vo vzduchu. V zmysle terminológie NFPA 921:2014 sa však za elektrické iskry považujú svietiace častice roztaveného kovu, odletujúce z konca elektrického oblúka.

Ak elektrické iskry vznikajú len z oblúka medzi medenou a ocelovou elektródou, tieto sú tvorené roztaveným kovom a počas ich letu vzduchom sa chladia veľmi rýchlo. Nebezpečnejšia je situácia s výskytom hliníkovej elektród, nakoľko hliníkové častice sa môžu vznietiť a dosiahnuť veľmi vysokú teplotou. Horiace hliníkové iskry sú preto účinnejším iníciačným zdrojom ako iskry medené alebo ocelové. Elektrické iskry napriek tomu dokážu iniciovať len ľahko zápalné palivá za priaznivých podmienok (NFPA 921:2014). Príkladom takýchto palív sú (okrem horľavých plynov, pár, rozvírených a usadených prachov) organické látky s veľkým pomerom merného povrchu k ich hmotnosti a nízkym koeficientom tepelnej vodivosti (napr. seno, slama a pod.).

2.3.3.4.

Statická elektrina

Statická elektrina dokáže iniciovať predovšetkým výbušné atmosféry tvorené horľavými plynmi a parami horľavých kvapalín, ale za určitých okolností aj rozvírenými prachmi. Ak sú dve látky vo vzájomnom kontakte a minimálne jedna z nich je schopná sa elektrostaticky nabiť, tak pri ich oddelovaní sa za určitých podmienok môžu vytvárať elektrostatické náboje. Proces iníciaie ovplyvňuje množstvo faktorov ako energia výboja, dĺžka dráhy výboja a čas trvania výboja. Energia výboja je daná rovnicou [2.85] (Damec 1998).

$$E = 0,5 \cdot C \cdot U^2 = 0,5 \cdot Q \cdot U \quad (\text{J}) \quad [2.85]$$

E : energia výboja (J)

C : elektrická kapacita objektu (F)

U : rozdiel potenciálov medzi objektmi (V)

Q : náboj na objekte (C)

U vodivých objektov, u ktorých je možné zistiť elektrickú kapacitu voči zemi, je elektrický náboj daný rovnicou [2.86]. Pre predmety z izolačných materiálov u ktorých nie je možné merať elektrickú kapacitu sa elektrický náboj počíta z povrchovej hustoty náboja a veľkosti plochy objektu z ktorej sa výboj uskutoční podľa rovnice [2.87] (Damec 1998).

$$Q = C \cdot U \quad (\text{C}) \quad [2.86]$$

$$Q = \sigma \cdot A \quad (\text{C}) \quad [2.87]$$

σ : povrchová hustota elektrického náboja (C.m⁻²)

A : plocha objektu (m²)

Časová konštanta vybíjania sa vypočíta podľa rovnice [2.88]. Časová konštanta vybíjania sa porovná s indukčnou periódou výbušnej atmosféry. Ak je časová konštanta vybíjania kratšia ako indukčná perióda výbušnej atmosféry, nemôže elektrostatický výboj iniciovať danú výbušnú atmosféru. Preto norma ČSN 30 2030:2004 vyžaduje ako dôle-

žitie opatrenie proti účinkom statickej elektriny, aby bola konštanta vybíjania nižšia ako 0,01 s. Skrátenie konštanty vybíjania na požadovanú hodnotu je možné dosiahnuť znížením elektrickej kapacity elektrizovateľných materiálov (Damec 1998).

$$\tau = R_S \cdot C \quad (\text{s}) \quad [2.88]$$

τ : časová konštanta vybíjania (s)

R_S : zvodový elektrický odpor (Ω)

Ďalšou formou statickej elektriny je blesk. Typický blesk má jadro z plazmy s priemerom od 12,7 do 19 mm, obklopené 102 mm hrubým kanálikom prehriateho ionizovaného vzduchu. Pre blesk sú typické prúdy 24 kA (ale môžu presiahnuť aj 200 kA) a napätia dosahujú až 15 MV (NFPA 921:2014).

Blesky majú tendenciu udierať do najvyšších objektov nad zemou (na trase ich výboja). Blesk môžu zasiahnuť stavbu štyrmi cestami (NFPA 921:2014):

- zásahom kovového objektu (napr. TV anténa, kupola alebo klimatizačnej jednotky vyčnievajúcej nad strechou),
- priamym zásahom stavby,
- zásahom blízkeho stromu alebo iného vysokého objektu a následným horizontálnym prenosom,
- zásahom blízkeho vzdušného vodiča (distribučnej siete) a jeho zvedením do stavby.

Poškodenie bleskom je spôsobené dvomi charakteristickými vlastnosťami blesku. Prvou je mimoriadne vysoký elektrický potenciál a energia blesku a druhým veľmi vysoká tepelná energia a teplo generované elektrickým výbojom. Príkladom týchto efektov je (NFPA 921:2014):

- strom môže byť zničený explóziou vyvolanou bleskom (úder blesku spôsobí okamžité vyparenie vlhkosti v strome a vyparenie kvapalnej vody na paru spôsobí explóziu),
- medené vodiče, ktoré nie sú nadimenzované na prúdové zaťaženie rádovo tisíckami ampérov sa môžu roztaviť, poškodiť alebo úplne zničiť,
- pri údere blesku do stavby zo železobetónovými konštrukciami môže nastať situácia, kedy elektrický prúd bude tiecť cez oceľové výstuže železobetónu (elektrický prúd ide cestou najnižšieho odporu) a uvoľnené teplo môže zničiť okolitý betón explóziou (spôsobenou veľmi rýchlym odparením vody),
- spôsobenie požiaru poškodením rozvodu plynu.

2.3.3.5.

Nesprávna inštalácia elektrického zariadenia alebo zhoršenie možnosti odvodu tepla

Nesprávna inštalácia elektrického zariadenia je najčastejšou príčinou vzniku požiarov od elektrických zariadení. Nesprávna inštalácia súvisí s obmedzením množstva odvedeného tepla, ktoré sa počas prevádzky toho zariadenia uvoľňuje (Jouleov stratový výkon definovaný rovnicou [2.78]).

Elektrické zariadenia sa z hľadiska uvoľňovania tepla delia na tie, ktorých hlavným účelom je uvoľňovanie tepla (tzv. elektrotepelne spotrebiče) a na zariadenia pri činnosti ktorých sa uvoľňuje teplo ako vedľajší (vo väčšine prípadov neželaný) produkt (napr.

klasické žiarovky, kompaktné úsporné žiarivky, elektromotory a pod.). Oba druhý týchto zariadení ak sú nainštalované alebo používané spôsobom, ktorí bráni odvodu tepla do okolia (napr. zakrytie elektrotepelného spotrebiča textilom, inštalácia žiarovky príliš blízko dreveného trámu alebo nános hrubej vrstvy organického prachu na elektromotore) môžu spôsobiť požiar.

Vo všeobecnosti platí, že elektrotepelné spotrebiče predstavujú vyššie riziko ako elektrospotrebiče, ktoré majú primárne iný účel ako premenu elektrickej energie na teplo. Tento záver však nemusí platiť vždy, napr. v prípade klasických žiaroviek sa na svetlo premení len 8 až 10 % elektrickej energie a zvyšných 90 až 92 % sa premení na teplo (môžu byť teda považované skôr za elektrotepelný spotrebič). A v súčasnosti sa v Európskej únii aj tak predávajú, nakoľko nariadeniami komisie (ES) č. 244/2009 a č. 245/2009 bolo ich používanie v Európskej únii prakticky zakázané. Napriek tomu sú v EÚ tieto svetelné zdroje rozšírené dodnes a rovnako je predpoklad ich širokého využívania (aj keď so stále menším podielom na celkovom množstve využívaných svetelných zdrojov) aj v budúcnosti. Preto sa klasické žiarovky dnes nepredávajú ako svetelné zdroje, ale ako tepelné telesá alebo ako špeciálne zdroje svetla do priemyslu nevhodné na bežné osvetlenie.

Minimálne vzdialenosti elektrotepelného spotrebiča od materiálov s triedou reakcie na oheň inou ako A1 alebo A2 definuje vyhl. MV SR č. 401/2007 Z. z. v prílohe č. 1 tak, ako sú uvedené v tabuľke 2-12. Uvedené hodnoty však platia len v tom prípade, ak výrobca elektrotepelného spotrebiča neuvádza v sprievodnej dokumentácii väčšie vzdialenosti. Na tomto mieste je však potrebné upozorniť, že nedodržanie vzdialeností v zmysle citovaného právneho predpisu môže byť vyhodnotené ako zanedbanie povinností na úseku ochrany pred požiarom, ale to samo o sebe neznamená, že bolo príčinou vzniku požiaru. Na vyvodenie takéhoto záveru sú potrebné ďalšie dôkazy potvrdzujúce túto hypotézu.

Tabuľka 2-12 Minimálne vzdialenosti elektrotepelného spotrebiča od materiálov s triedou reakcie na oheň inou ako A1 alebo A2

Elektrotepelný spotrebič	Bezpečná vzdialenosť (mm)
Elektrotepelný spotrebič vo všetkých smeroch	200
Elektrický infražiariv a) od hornej hrany b) v smere sálania c) v ostatných smeroch	400 800 200
Elektrické akumulčné kachle a) v smere výfuku horúceho vzduchu b) v ostatných smeroch	1000 200

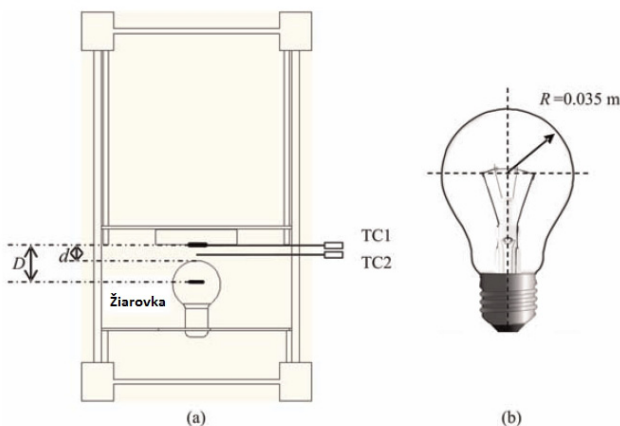
Prameň: vyhl. MV SR č. 401/2007 Z. z.

Ďalšou príčinou vzniku požiaru od elektrotepelných spotrebičov môže byť porucha termostatu (alebo iného termoregulačného prvku). Príkladom je porucha termostatu rýchlovarnej kanvice. Pri poruche termostatu dôjde k vypareniu všetkej vody z kanvice a následnému nárastu teploty vyhrievacej špirály na hodnoty rádovo stovky stupňov Celzia, ktorá môže spôsobiť roztavenie a následnú iniciáciu plastových častí kanvice.

Účinnosť klasickej žiarovky ako iniciálneho zdroja posúdili An a kol. (2012). Na výskum použili vzorku dreva Paulownie s rozmermi 0,2 x 0,2 x 0,02 m, absolútnou vlhkosťou

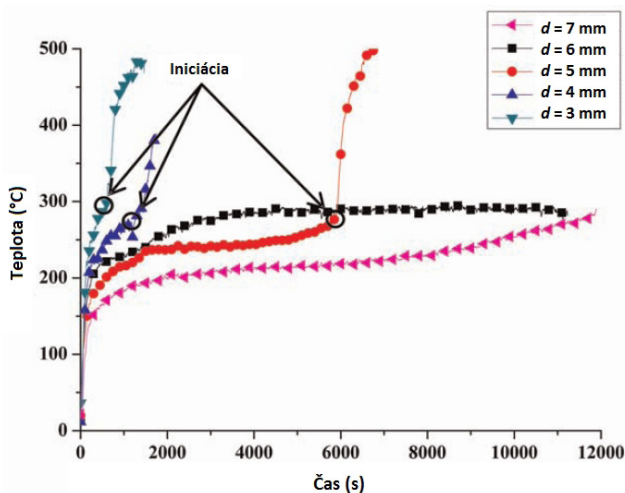
1% a hustotou $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Vzorka bola zafixovaná tepelným tokom z klasickej žiarovky s príkonom 200 W. Na výskum bola použitá aparátúra znázornená na obr. 2-22, pričom boli skúmané tri vzájomné orientácie vzorky voči žiarovke (horizontálna nad žiarovkou vo vzdialenostiach 0, 3, 4, 5, 6 a 7 mm, vertikálna vo vzdialenostiach 0 a 3 mm a horizontálna pod žiarovkou vo vzdialenosti 3 mm). Pri umiestnení vzorky v horizontálnej polohe nad žiarovkou bolo pozorované zapálenie vzorky do vzdialenosti 5 mm od žiarovky (pri väčšej vzdialenosti zapálenie vzorky nebolo pozorované). Pri vertikálnej orientácii nebolo zapálenie vzorky pozorované pri žiadnej zo skúmaných vzdialeností od žiarovky. Pri horizontálnej orientácii vzorky pod žiarovkou vo vzdialenosti 3 mm bolo pozorované vznietenie v čase približne rovnakom ako pri horizontálnej orientácii vzorky nad žiarovkou (1623 s pri vzorke nad žiarovkou a 1600 s pri vzorke pod žiarovkou).

Teploty zmerané termočlánkom TC1 (na povrchu vzorky) pri jej horizontálnej orientácii nad žiarovkou vo vzdialenosti od 3 do 7 mm ilustruje obr. 2-23.



TC1: termočlánok na povrchu skúmanej vzorky, TC2: termočlánok v strede medzi povrchom žiarovky a povrchom vzorky, D : vzdialenosť stredu vlákna žiarovky od povrchu vzorky, d : vzdialenosť povrchu žiarovky od povrchu vzorky.

Obrázok 2-22 Aparatúra na meranie kritickej vzdialenosti žiarovky od materiálu a) aparátúra, b) žiarovka (An a kol. 2012)



Obrázok 2-23 Teplota na povrchu horizontálne orientovanej vzorky dreva Paulownie zafixovanej zo spodnej strany žiarovkou s príkonom 200 W pre rôzne vzdialenosti od žiarovky (An a kol. 2012)

Čas do zapálenia vzorky pri jej zatažení žiarovkou je možné odhadnúť podľa rovnice [2.89], ktorú odvodili An a kol. (2012).

$$t_{\text{ign}} = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot c}{\pi} \cdot \frac{(T_{\text{ign}} - T_{\text{a}})^2}{(q'' - q_{\text{cr}})^2} \quad (\text{s}) \quad [2.89]$$

t_{ign} : čas do iniciácie vzorky (s)

λ : koeficient tepelnej vodivosti vzorky ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

ρ : hustota vzorky ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

c : merná tepelná kapacita vzorky ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_{ign} : teplota na povrchu vzorky v okamihu iniciácie (K)

T_{a} : teplota okolia (K)

q'' : hustota tepelného toku vyžarovaného z povrchu žiarovky ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

q''_{cr} : kritická hustota tepelného toku vzorky ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Hustota tepelného toku vyžarovaného z povrchu žiarovky sa počíta podľa rovnice [2.90], ktorú odvodili An a kol. (2012).

$$q'' = \frac{\eta \cdot P}{4 \cdot \pi \cdot D^2} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad [2.90]$$

η : podiel energie vyžiarenej radiáciou k elektrickému príkonu žiarovky (-)

P : elektrický príkon žiarovky (W)

D : vzdialenosť povrchu exponovaného vzorky od stredu vlákna žiarovky (m)

Kritická hustota tepelného toku skúmanej vzorky dreva Paulownie je podľa An a kol. (2012) medzi 5,42 až 5,69 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Uvedené kritická hustota tepelného toku je však nižšia, ako bežne akceptovaná kritická hustota tepelného toku dreva a materiálov na báze dreva (bežne sa uvažuje hodnota kritickej hustoty tepelného toku 10 až 20 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$). Takto stanovené nižšie hodnoty mohli mať viac príčin. Prvou je skutočnosť, že v metodike, ktorú použili An a kol. (2012) bola žiarovka nie len infračervený žiarič, ale aj pomocný iniciačný zdroj. Pomocný iniciačný zdroj normalizovaných skúšok (napr. kónický kalorimeter podľa ISO 5660-1:2002 alebo metóda radiačného panela podľa ISO 5657:1997) je umiestnený vyššie nad povrchom vzorky. Druhou príčinou bol fakt, že citovaný autorský kolektív pri určení kritickej hustoty tepelného toku vychádzal len z hustoty tepelného toku prenášaného radiáciou. So vzájomnej konfigurácie žiarovky a skúmanej vzorky však vyplýva, že vzorka je zatažená aj tepelnou konvekciou (ktorej hustotu na celkovej hustote tepelného toku nie je možné zanedbať).

Podobný experiment robili aj Wang a kol. (2014). Citovaný autorský kolektív zahrnul do kritickej hustoty tepelného toku aj tepelný tok prenášaný konvekciou a ako výslednú kritickú hustotu tepelného toku uvádza hodnotu okolo 10 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ (táto hodnota sa mierne mení v závislosti od orientácie vzorky). Uvedená hodnota je už podstate bližšie k hodnotám stanoveným na kónickom kalorimetri (podľa ISO 5660-1:2002) a radiačnom panelu (podľa ISO 5657:1997). Uvedenú skutočnosť je potrebné brať do úvahy pri interpretácii akýchkoľvek laboratórnych výsledkov pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov.

2.3.4. Tepelné prejavy mechanickej energie

Tepelné prejavy mechanickej energie môžu ohrievať povrchy (mechanizmus iniciácie je zhodný s iniciáciou horúcim povrchom) alebo vytvárať mechanické iskry. Mechanická energia sa premieňa na tepelnú vzájomným trením alebo mechanickým nárazom telies.

Mechanické iskry dokážu veľmi účinne iniciovať výbušnú atmosféru horľavých plynov, pár horľavých kvapalín a s nižšou pravdepodobnosťou aj rozvírených prachov. Iniciačná schopnosť mechanických iskier závisí od doby ich živnosti a energie. Energia mechanickej iskry je daná jej hmotnosťou a skutočnosťou či je iskra tvorená časticou roztaveného kovu alebo horiaceho kovu. Mechanické iskry dokážu okrem výbušných atmosfér (v závislosti od doby živnosti a energie) iniciovať usadenú vrstvu organického prachu alebo suchých vláknitých materiálov. Mechanické iskry s vysokou energiou (iniciačnou schopnosťou) môžu vzniknúť pri náraze ľubovoľného materiálu o skorodovanú oceľ ak sa na mieste nárazu nachádzajú stopy hliníka alebo horčíka. Takéto iskry môže dokonca vyvolať náradie v iskrovo bezpečnom vyhotovení (meď, Monelov kov (zliatina niklu 68 % hmot., meď 32 % hmot. a stopové množstvá mangánu a železa), berýliový bronz apod.) (Damec 1998).

V praxi dochádza k treniu napr. v trecích spojkách, klzných ložiskách, brzdách, remeňových prevodoch, pri navíjaní vláknových materiálov a pod. Trecí výkon meniaci sa na teplo je úmerný normálovej prítláčnej sile medzi telesami, koeficientu trenia a rýchlosti vzájomného pohybu telies. Koeficient trenia závisí od druhu trenia, styčného povrchu a jeho stave (drsnoty), druhu materiálu a vzájomnej rýchlosti pohybu telies. Počas normálneho prevádzkového stavu je teplo odvádzané do okolia. K prehrievaniu dochádza až pri porušení tepelnej rovnováhy. Porušenie tepelnej rovnováhy (resp. nerovnováha v prospech odvodu tepla do okolia sa zemní na nerovnováhu v prospech kumulácie tepla) nastáva predovšetkým následkom zvýšenia množstva uvoľneného tepla (napr. v dôsledku nárastu koeficienta trenia pri nedostatočnom mazaní trecích plôch) (Damec 1998).

Medzi tepelné prejavy mechanickej energie môžeme zaradiť aj ohrev plynov kompresným teplom. Kompresným tepom sa ohrieva napr. zmes vzduchu a paliva vo vznetrových motoroch. Množstvo uvoľneného kompresného tepla je úmerné podielu tlakov plynu po a pred jeho stlačením podľa rovnice [2.91], ktorú uvádza napr. Damec (1998).

$$\Delta T = T_{\text{POC}} \cdot \left[\left(\frac{p_{\text{KON}}}{p_{\text{POC}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (\text{K}) \quad [2.91]$$

ΔT : nárast teploty spôsobený kompresným teplom (K)

T_{POC} : počiatková teplota plynu (K)

p_{KON} : konečný tlak plynu (Pa)

p_{POC} : počiatkový tlak plynu (Pa)

n : polytropický exponent (-)

2.3.5. Exotermické chemické reakcie

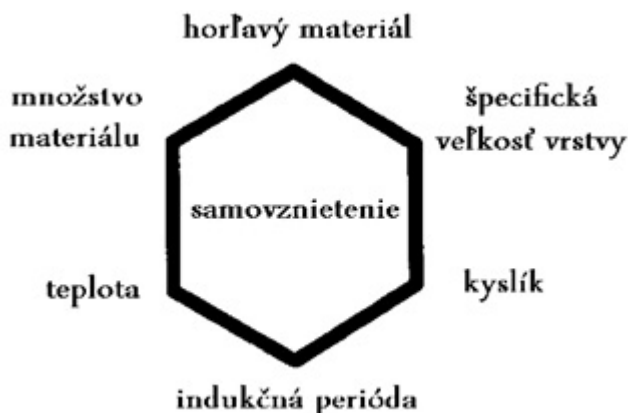
Do tejto skupiny patria všetky exotermické reakcie (okrem plameňa), pri ktorých sa môže uvoľniť dostatočné množstvo tepla na iniciáciu požiaru. Príkladom takýchto

reakcií je rozpúšťacie a zriedčovacie teplo alebo reakcia alkalických kovov s vodou. Táto problematika je bližšie popísaná v nasledujúcej podkapitole 2.4 (Samovznietenie).

2.4. Samovznietenie

Na úvod tejto podkapitoly je potrebné upozorniť na rozdiel medzi odbornými termínmi autoignition a spontaneous ignition. Za autoignition sa v zmysle definície NFPA 921:2014 považuje iniciácia procesu horenia teplom, ale bez pôsobenia iskry alebo plameňa. Spontaneous ignition definuje NFPA 921:2014 ako iniciáciu horenia materiálu následkom chemických alebo biologických reakcií ktoré uvoľnia dostatok tepla na iniciáciu materiálu. Do slovenčiny sa oba termíny často prekladajú ako samovznietenie. Korektnejšie by však bolo autoignition prekladať ako vznietenie a spontaneous ignition ako samovznietenie.

Samovznietenie (spontaneous ignition) je proces pri ktorom sa teplo potrebné na iniciáciu procesu horenia vyprodukuje na základe interakcie medzi látkou a okolitým prostredím (napr. na základe reakcie medzi látkou a vzdušným kyslíkom). Aby tento proces mohol prebiehať musí byť látka ohriata na určitú minimálnu teplotu, táto teplota je však obyčajne nižšia ako teplota okolia. Preto je správne tvrdenie, že na samovznietenie nie je potrebný iniciálny zdroj, ale tvrdenie, že na vznik procesu samovznietenia nie je potrebné teplo nie je celkom korektné. Uvedené tvrdenie dokazuje aj hexagón samovznietenia (obr. 2-24) podľa ktorého je jednou z podmienok vzniku samovznietenia teplota. Tvrdenie, že medzi procesom vznietenia a samovznietenia neexistuje podstatný rozdiel uvádza aj Filipi (2003).



Obrázok 2-24 Hexagón samovznietenia (Damec a kol. 1999)

Rozdiel medzi vznietením a samovznietením je buď v čase indukčnej periódy (tepelné samovznietenie) alebo spôsobe vývoja tepla potrebného na iniciáciu procesu horenia. Zvláštnu skupinu tvoria pyroforické (samozápalné) látky, ktoré sa samovoľne vznietia pri styku so vzduchom už za bežných teplôt (napr. biely fosfor).

Podľa javu, ktorý má rozhodujúci význam v začiatčom štádiu procesu samovznietenia na stúpaní teploty, rozdeľujeme samovznietenie do troch skupín (Balog 1999):

1. **Samovznietenie fyzikálno-chemické** spôsobené javmi fyzikálneho a chemického pôvodu (adsorpcia plynov a pár, zvýšená teplota prostredia, prítomnosť katalyzátorov).
2. **Samovznietenie chemické** (oxidácia kvapalín s uhlíkom viazaným dvojitými a/alebo trojitými väzbami, exotermické reakcie pri styku chemických látok).
3. **Samovznietenie biologické** (činnosť mikroorganizmov, biologické pochody v bunkách).

Teplota potrebná na zapálenie látky v prípade procesu samovznietenia vzniká v látke samotnej ako dôsledok chemických, fyzikálnych alebo biologických procesov. Pod pojmom samovznietenie je treba chápať nie len vlastné zapálenie látky, ale komplexný samovoľne prebiehajúci proces od prvého okamžiku nárastu teploty (teplota samozahrievania) až k dosiahnutiu teploty samovznietenia ako dôsledok chemických, fyzikálnych alebo biologických procesov. Výsledkom procesu samovznietenia je vznietenie a následné horenie látky plameňovým alebo bezplameňovým spôsobom (Balog 1999).

Balog (1999) delí horľavé látky podľa ich teploty samovznietenia na látky, ktoré majú teplotu samovznietenia nad bežnou teplotou a na látky, ktoré majú teplotu samovznietenia pod bežnou teplotou (samozápalné alebo pyroforické látky). Za bežnú považuje teplotu okolo 20 až 25 °C.

2.4.1.

Fyzikálno-chemické samovznietenie

Tepelné samovznietenie je najčastejším prípadom fyzikálno-chemického samovznietenia. Pod pojmom tepelné samovznietenie rozumieme proces, pri ktorom dôjde k vznieteniu horľavej látky dlhodobým pôsobením pomerne vysokej teploty (napr. 80 až 100 °C). Pri bežných teplotách (15 až 25 °C) reakcia medzi palivom (bežné horľavé materiály ako drevo, polyetylén, bavlnené handry atď.) a vzdušným kyslíkom prakticky neprebíha. Jej rýchlosť je taká malá, že proces oxidácie sa neprejavuje navonok žiadnym tepelným efektom. Rýchlejší proces oxidácie sa začína až po zahriatí materiálu na kritickú teplotu. Tepelné samovznietenie je teda proces termooxidácie, ktorý sa prejavuje horením (plameňovým alebo bezplameňovým) po predchádzajúcom samozahrievaní látok zahriatych na teplotu, pri ktorej uvoľnené reakčné teplo prevyšuje množstvo a rýchlosť odvádzaného tepla do okolia (Balog 1999).

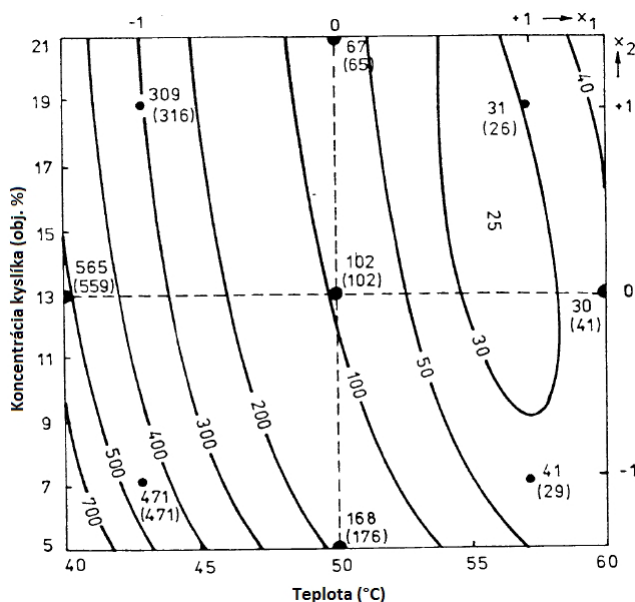
Dôležitým faktorom vplyvujúcim na proces tepelného samovznietenia je veľkosť objemu a povrchu materiálov. Pri veľmi malom objeme horľavej látky je jej povrch, ktorý odvádza vznikajúce teplo tak veľký, že uvoľnené teplo pri oxidácii i pri vysokých teplotách nemôže prevýšiť množstvo odvádzaného tepla a k samovznieteniu nedochádza. Dôležitým ukazovateľom požiarneho nebezpečenstva určitej látky so sklonom k samovznieteniu je preto jej merný povrch (Balog 1999).

Príčinou *chemického samovznietenia* sú reakcie, ktoré prebiehajú pri styku chemických látok so vzduchom, vodou alebo po vzájomnom zmiešaní. Do tejto skupiny zaraďujeme niekedy aj fyzikálne a fyzikálno-chemické deje, pri ktorých dochádza k uvoľneniu dostatočného množstva tepla na zahájenie procesu samovznietenia (Balog 1999).

Do tejto skupiny zaraďujeme látky, ktoré sa vznietia účinkom vzduchu pri bežných teplotách buď v čistej forme alebo rozptýlené na horľavom organickom nosiči s veľkým povrchom (napr. textilie). Patrí sem napr. biely fosfor, karbidy, sulfidy kovov, náterové látky a pod.). Zvláštne postavenie majú kovy. Napr. biely fosfor sa na vzduchu okamžite vznieti za vzniku oxidu. U niektorých iných látok, napr. fermeže čas zahájenia procesu

samovznietenia trvá 3 až 24 hodín. Kovy obyčajne nebývajú spájané s predstavou príčiny samovznietenia s výnimkou alkalických kovov, o ktorých je všeobecne známe, že sa vznietia pri styku s vodou za vývoja veľkého množstva tepla (teplota stúpa na 600 až 650 °C). Niektoré kovy v jemnom práškovom stave majú však sklon k samovznieteniu. Do tejto skupiny patrí napr.: horčík, zinok, hliník. Práškové olovo, železo, nikel a meď sú dokonca samozápalné (pyroforické). Niektoré kovy vo forme prachu majú sklon k chemickému samovznieteniu (napr. hliníkový prach reaguje s chlóróm a brómom i pri normálnych teplotách, hliníkový prach rovnako reaguje s chlóróvanými uhľovodíkmi a alkoholmi) (Balog 1999).

Závislosť indukčnej periódy samozapálenia bieleho fosforu od teploty okolia a koncentrácie kyslíka v oxidačnej atmosfére ilustruje obr. 2-25.



Obrázok 2-25 Závislosť indukčnej periódy samozapálenia (samovznietenia) bieleho fosforu od teploty okolia a koncentrácie kyslíka v oxidačnej zmesi (Balog 1999)

2.4.2. Chemické samovznietenie

Najrozsiahlejšou skupinou látok schopných sa samovznietiť na základe chemických reakcií sú oleje a tuky obsahujúce nenasýtené (dvojité a/alebo trojité väzby). Minerálne oleje sú schopné sa samovznietiť iba pri vyšších teplotách za predpokladu, že sú znečistené prímiesami rastlinných olejov. Oxidácii za nízkych teplôt podliehajú predovšetkým oleje, ktoré obsahujú veľké množstvo nenasýtených mastných kyselín (napr. ľanový, bavlníkový, drevný, konopný a sójový olej) (Balog 1999).

Oleje a tuky podliehajú samovznieteniu iba za nasledovných podmienok (Balog 1999):

- prítomnosť nenasýtených zlúčenín v olejoch alebo tukoch,
- veľký povrch olejov alebo tukov pri malom odvode tepla (nanesenie olejov alebo tukov na nosič),
- optimálny pomer medzi hmotnosťou olejov alebo tukov a materiálov, ktoré sú nimi nasýtené (nosiče),
- určitý rozsah hustoty znečisteného materiálu (nosiča).

Sklon k samovznieteniu je ovplyvnený predovšetkým množstvom nenasýtených mastných kyselín, ktoré vo svojej molekule majú jednu alebo viac dvojitých väzieb. Rastlinné oleje a tuky, pokiaľ sa nachádzajú v sudoch a nádobách (nie sú nanesené na nosič – napr. handru), nemajú sklón k samovznieteniu (Balog 1999).

Rastlinné oleje obsahujú nasledovné mastné kyseliny: palmitovú (bez dvojitej väzby), stearovú (bez dvojitej väzby), olejovú (jedna dvojitá väzba), linolovú (dve dvojité väzby), linolénovú (tri dvojité väzby). Na základe počtu dvojitých väzieb je možné konštatovať, že najväčší sklón k samovznieteniu majú oleje a tuky s vysokým obsahom kyseliny linolénovej a linolovej. Vysoký obsah kyseliny linolénovej a linolovej majú napr. ľanový olej, drevný olej, konopný olej a sójový olej. Látky s vysokým obsahom kyseliny stearovej a palmitovej prakticky nemajú sklón k samovznieteniu (Balog 1999).

Obsah nenasýtených zlúčenín v olejoch sa hodnotí pomocou jódového čísla, ktoré označuje množstvo jódu v gramoch, ktoré bolo naviazané na 100 g skúšanej látky. Hodnoty jódového čísla pre najbežnejšie oleje a tuky sú v tabuľke 2-13. Všeobecne sa dá povedať, že rastlinné oleje a tuky s jódovým číslom vyšším ako 100 majú veľký sklón k samovznieteniu. Pre iné tuky toto pravidlo neplatí. Rybí tuk má napr. pomerne vysoké jódové číslo, ale jeho sklón k samovznieteniu je nižší ako u rastlinných olejov s vyšším jódovým číslom. Príčinou sú antioxidantné látky v rybom tuku (Balog 1999).

Tabuľka 2-13 Jódové číslo a bod vzplanutia a vznietenia vybraných olejov a tukov

Látka	Bod vzplanutia (°C)	Bod vznietenia (°C)	Jódové číslo (-)	Sklón k samovznieteniu
Čínsky drevný olej	–	–	262	áno
Porillový olej	272	–	180 až 208	áno
Ľanový olej	od 206	od 345	170 až 204	áno
Rybí olej	216	277	110 až 200	áno
Drevný olej	–	–	160 až 175	áno
Jutový olej	–	–	145 až 160	áno
Konopný olej	229	410	150 až 166	áno
Orechový olej	–	–	130 až 166	áno
Makový olej	od 200	od 340	139 až 167	áno
Sójový olej	282	446	120 až 160	áno
Slniečnicový olej	180 až 230	370 až 380	125 až 136	sporné
Sezamový olej	220 až 223	340 až 410	103 až 116	sporné
Horčicový olej	297	–	106 až 113	sporné
Bavlníkový olej	233 až 240	350 až 380	99 až 120	sporné
Repkový olej	165 až 300	475	97 až 108	sporné

Pokračovanie Tabuľky 2-13

Látka	Bod vzplanutia (°C)	Bod vznietenia (°C)	Jódové číslo (-)	Sklon k samovznieteniu
Mandľový olej	–	–	93 až 105	sporné
Podzemnicový olej	282	od 445	84 až 100	sporné
Ricínový olej	–	–	81 až 91	nie
Olivový olej	225 až 244	–	70 až 100	nie
Kostný tuk	–	–	48 až 56	nie
Palmový olej	–	–	44 až 54	nie
Hovädzí loj	255 až 265	–	40 až 48	nie
Hovädzia masť	230 až 260	340 až 445	53 až 77	nie
Maslo	220 až 230	–	25 až 47	nie
Kokosový olej	216 až 266	–	7.5 až 10.5	nie

Prameň: Balog (1999)

Iniciácia procesu samozahrievania a následného samovznietenia u nenasýtených olejov a tukov okrem tepelných podmienok musí spĺňať nasledujúce predpoklady (Balog 1999):

- olej alebo tuk musí mať sklon k samovznieteniu (vysoké jódové číslo a malý obsah antioxidantných látok),
- olej alebo tuk musí byť nasiaknutý do porézneho, vláknitého materiálu (bavlna, lan, celulóza, piliny, sadze, čistiaca bavlna, korok penové porézne polymérne materiály – napr. polyuretán, mikroporézna guma, sklená vata, čadičová vata a pod.),
- porézny a vláknitý materiál musí mať malú tepelnú vodivosť a veľký merný povrch (čím je tepelná vodivosť materiálu nižšia, tým viac sa zväčšuje schopnosť akumulácie tepla uvoľňovaného v priebehu autooxidácie a čím je aktívny povrch väčší, tým aktívnejšie reaguje vzdušný kyslík s olejom alebo tukom),
- olej musí byť rozptýlený na vláknotom a poréznom materiáli (nosiči) v kritickom množstve (ak je poréznym materiál presýtený, vo väčšine prípadov k samovznieteniu neprichádza), kritické množstvo je potrebné stanoviť experimentálne a u veľa nosičov ešte stále nie je známe,
- v horľavom materiáli musí byť zabezpečená akumulácia tepla (pri tepelných stratách nie je možné zahájenie procesu samovznietenia).

Do skupiny látok, ktoré sa vznietia pôsobením vody patria predovšetkým alkalické kovy (napr. sodík, draslík, rubídium atď.). Pri reakcii týchto látok s vodou vzniká teplo a rozkladom vody vodík, ktorý sa vznieti a môže iniciovať požiar. Okrem samotných alkalických kovov sa exotermickou reakciou s vodou vyznačujú aj kovy alkalických zemín (napr. vápnik, stroncium atď.). Okrem alkalických kovov a kovov alkalických zemín patrí do tejto skupiny aj oxid vápenatý (pálené vápno), ktorý sa pri reakcii s vodou zahrieva. Teplota môže dosiahnuť 400 až 600 °C. To znamená, že väčšina horľavých látok používaných v praxi sa pri tejto teplote môže zapáliť (teplota vznietenia väčšiny horľavých materiálov je od 200 do 550 °C). V priemysle sa môžeme stretnúť aj s ďalšou látkou citlivou na vlhkosť a vodu, ktorou je karbid vápnika (CaC₂). Karbid vápnika reaguje s vodou za vzniku horľavého acetylénu. Z jedného kilogramu karbidu vápnika sa uvoľní 260 až 300 l acetylénu (podľa kvality a zrnitosti karbidu) (Balog 1999).

Do kategórie látok, ktoré sa vznietia pri vzájomnom styku patria tuhé a kvapalné oxidačné prostriedky, ako napr. kvapalný kyslík, chlór, bróm, kyslíka dusičná, peroxid vodíka, oxid chrómový a chlorečnany. Uvedené látky reagujú predovšetkým s organickými zlúčeninami (Balog 1999).

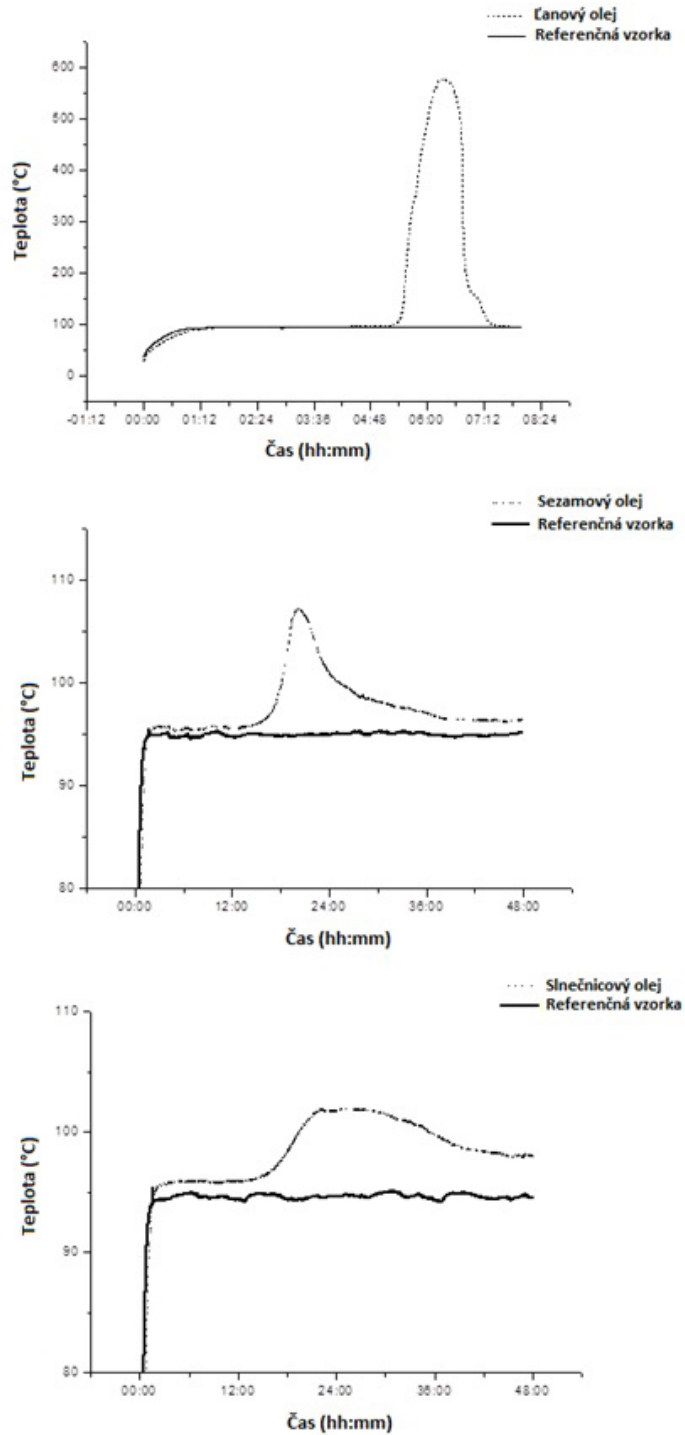
Na stanovenie sklonu k samovznieteniu olejov a tukov s obsahom nenasýtených mastných kyselín sa používa viacero skúšok. Medzi najčastejšie používané patrí Mackey test. Mackey test je založený na meraní teploty vo vnútri bavlnenej vaty napustenej skúšaným olejom alebo tukom, umiestnenej v drôtenom košíku vo vnútri prístroja vyhriateho na teplotu 100 °C, počas jednej alebo troch hodín. Látka nemá sklon k samovznieteniu ak teplota vo vnútri bavlnenej vaty, počas stanoveného časového interval, neprekročí hodnotu 100 °C. Ak teplota dosiahne hodnotu 250 °C skúška sa ukončí a skúšaná látka sa vyhodnotí ako látka s vysokým sklonom k samovznieteniu.

Nevýhodou Mackay testu je jeho relatívne nízka opakovateľnosť a reprodukovateľnosť a pomerne silná závislosť od podmienok experimentu (najmä od pomeru hmotností oleja alebo tuku k hmotnosti poréznej látky). Ďalšou významnou nevýhodou je obmedzená teplota okolia pri ktorej umožňuje sklon k samovznieteniu skúmať (100 °C – nakoľko sa ako teplo-výmenné médium používa voda). Preto pre korektné posúdenie sklonu látky k samovznieteniu je potrebné vykonať viac experimentov – najmä pri viacerých hmotnostných pomeroch medzi skúmanou látkou a poréznym nosičom. Počet opakovaní závisí od správania sa látky počas testu a skúseností obsluhy (čím väčší rozptyl medzi výsledkami pre rôzne pomery medzi hmotnosťou skúšanej látky a poréznym nosičom, tým viac experimentov je potrebné vykonať).

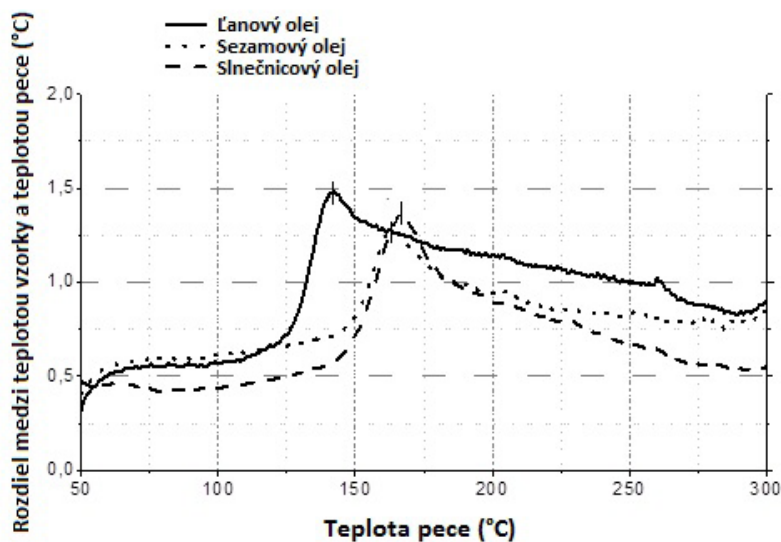
Príklad výsledkov Mackey testu pre ľanový, sezamový a slnečnicový olej ilustruje obr. 2-26. Z údajov na citovanom obrázku vyplýva, že ľanový olej má vysoký sklon k samovznieteniu, zatiaľ čo sezamový a slnečnicový olej majú mierny sklon k samovznieteniu.

Okrem Mackey testu sa sklon olejov a tukov k samovznieteniu skúša ja prostredníctvom ARC (Accelerating Rate Calorimetry) kalorimetrie, pri ktorej sa vyhodnocuje rozdiel medzi teplotou vzorky a pece. Čím je teplota vzorky vyššia v porovnaní s teplotou pece tým má vzorka vyšší sklon k samovznieteniu. Okrem maximálneho rozdielu je pre posúdenie sklonu k samovznieteniu dôležitá aj teplota pri ktorej nastal prvotný nárast teploty vzorky a teplota pri ktorej bol zaznamenaný maximálny rozdiel medzi uvedenými teplotami.

Príklad výsledkov ARC kalorimetrie pre ľanový, sezamový a slnečnicový olej ilustruje obr. 2-27. Z porovnania údajov na obr. 2-27 vyplýva, že pri ARC kalorimetrii je dôležitejším indikátorom sklonu látky k samovznieteniu teplota pece pri ktorej bol zaznamenaný maximálny rozdiel medzi teplotou pece a teplotou vzorky, ako maximálny rozdiel medzi uvedenými teplotami.



Obrázok 2-26 Výsledky Mackey testu pre ľanový, sezamový a slnečnicový olej (Martinka a kol. 2014b)



Obrázok 2-27 Rozdiely medzi teplotou pece a teplotami vzoriek ľanového, sezamového a slnečnicového oleja nanosených na poréznom nosiči zmerané metódou ARC kalorimetrie pri rýchlosti ohrevu $0,75 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ (Martinka a kol. 2014b)

Látky, ktoré sú schopné sa zapáliť pri styku so vzduchom pri bežnej teplote bez iniciálneho zdroja nazývame samozápalné alebo pyroforické. Do tejto skupiny látok patrí biely fosfor, fosforovodík, zinkový prach, hliníkový prach, karbidy alkalických kovov, sulfidy kovov, arzíny, fosfíny, rubídium, cézium a ďalšie (Balog 1999). V prípade uvedených alkalických kovov (rubídium a cézium) nie je príčinou vznietenia ich kontakt so vzduchom, ale styk so vzdušnou vlhkosťou. Podobne pri väčšine na tomto mieste uvádzaných samozápalných látok hrá v procese samovznietenia rozhodujúcu úlohu vzdušná vlhkosť.

2.4.3. Biologické samovznietenie

Samovznietenie na základe biochemických procesov patrí medzi najčastejšie druhy samovznietenia. Zvláštne postavenie majú rastlinné materiály, ktoré keď sú vlhké majú sklon k samozahrievaniu a následnému samovznieteniu. Z poľnohospodárskych produktov sú požiarné najnebezpečnejšie rastlinné materiály s celulózovým charakterom ako je seno, slama siláž, plevy, obilie a obilné výrobky, ďatelina, chmeľ, listie, bavlna, ľan, sisal, juta, drevené piliny, krmivá, tabak a pod. Sú to materiály, ktoré ľahko podliehajú oxidácii a z hľadiska horľavosti je dôležitá ich schopnosť tlieť. Tieto rastlinné produkty majú za určitých podmienok sklon k samovznieteniu (Balog 1999).

Biologické samovznietenie je špeciálny prípad samovznietenia prebiehajúceho v rastlinných produktoch, keď teplo potrebné k zrýchleniu oxidačných reakcií je dodávané biologickými procesmi. V rastlinných produktoch môže dôjsť ku všetkým trom druhom samovznietenia (Balog 1999):

- Tepelné samovznietenie môže nastať najčastejšie pri technologických procesoch spracovania týchto produktov (sušenie, mletie, granulácia a pod.).
- Chemické samovznietenie môže nastať napr. pri napustení týchto produktov olejmi s obsahom nenasýtených mastných kyselín alebo náterovými hmotami so sklonom k chemickému samovznieteniu. Zvlášť nebezpečná je napúšťacia fermež. Rastlinná hmota slúži ako veľmi dobrý nosič s veľkým povrchom.
- Biologické samovznietenie (v odbornej literatúre sa môžeme stretnúť aj s názvom mikrobiologické samovznietenie). Je najčastejšou príčinou samovznietenia v poľnohospodárstve. K týmto požiarom dochádza takmer výlučne pri skladovaní objemových krmovín a iných rastlinných produktov.

Proces biochemického samozahrievania, ktorý za priaznivých fyzikálno-chemických podmienok môže iniciovať samovznietenie uloženej rastlinnej hmoty, je možné rozdeliť na tri fázy:

- fyziologickú,
- mikrobiologickú,
- chemickú.

Vo fyziologickej fáze dýchanie buniek a rozmnožovanie termofilných baktérií je v progresívnom štádiu. V prvej fáze niekedy ešte dýcha živá hmota a rastlinné enzýmy štiepia organické látky. V podstate prebieha pomalé spaľovanie hmoty, ktorým sa uvoľňuje značné množstvo tepla. Rastlinný materiál je veľmi zlý vodič tepla a vrstva o hrúbke 2 až 2,5 m spravidla veľmi dobre izoluje vznikajúce i existujúce ložisko samozahrievania. Rastlinné bunky odumierajú pri teplote 40 až 45 °C a dýchanie prestáva. Pokiaľ je vlhkosť rastlinného materiálu pod 28% a ďalej sušením klesá, rozvoj mikroorganizmov sa zastavuje a teplota klesá (Balog 1999).

Uvoľneným teplom i vlhkosťou sa vytvárajú podmienky priaznivé pre vývoj a činnosť epifytných mikroorganizmov, teda pre druhú tzv. mikrobiologickú fázu. Najskôr sa rozvíjajú mezofilné mikroorganizmy (optimálna teplota okolo 30 °C), ktoré svojou činnosťou uvoľňujú ďalšie teplo, ktoré ďalším hromadením umožňuje rozvoj termofilných mikroorganizmov (optimálna teplota je 50 až 60 °C). V oboch uvedených skupinách sú zastúpené mnohé baktérie, aktinomycéty a plesne, ktorých rozkladnou činnosťou sa ďalej uvoľňuje a hromadí teplo (Balog 1999).

Ak dosiahne teplota v uloženej rastlinnej hmote 70 až 80 °C hynú i termofilné organizmy a začína tretia fáza – chemická. Chemickú fázu je možné charakterizovať ako suchú destiláciu, pri ktorej sa tvoria prchavé uhľovodíky a aktívne uhlie, ktoré sa tvorí od teploty 120 °C. Čím pomalšie vzniká, tým je aktívnejšie. K samovznieteniu prchavých splodín mikrobiologického rozkladu a suchej destilácie komprimovaných na povrchu aktívneho uhlia dochádza väčšinou náhlím prístupom vzdušného kyslíka (Balog 1999). Nevyhnutné podmienky pre začatie procesu samozahrievania sú (Balog, 1999):

- optimálna vlhkosť uskladnených rastlinných látok umožňujúca mikrobiálnu činnosť),
- akumulácia uvoľneného tepla vplyvom obmedzenej možnosti jeho unikania do okolia (minimálna hmotnosť uloženého materiálu, v ktorom môže nastať samovznietenie je približne 3000 kg lúčneho sena, t.j. objem 35 m³),
- dostatočný čas skladovania materiálu potrebný na prebehnutie biologických a chemických reakcií.

K procesu samovznietenia potom dochádza náhlým prístupom vzdušného kyslíka k ložiskám samovznietenia a to (Balog, 1999):

- pri čiastočnom odobratí materiálu,
- výmenou vzduchu umožnenou veľkými teplotnými rozdielmi medzi vnútrojškom uložennej hmoty a okolím,
- kanálmi zdegradovaného materiálu, cez ktoré plyny nahromadené v ložisku samovznietenia prúdia k povrchu uskladnenej rastlinnej hmoty.

Čas počas ktorého môže dôjsť k samovznieteniu sa udáva od troch dní do jedného roka (Balog, 1999).

2.4.4.

Samovznietenie uhlia

Aj keď samovznietenie uhlia môže byť zaradené medzi fyzikálno-chemické samovznietenie, bude mu v predloženej publikácii venovaná samostatná podkapitola. Prvým dôvodom je skutočnosť, že samovznietenie uhlia je komplexný proces, pri ktorom má rozhodujúci význam viac javov (samovznietenie uhlia je na rozhraní fyzikálno-chemického a chemického samovznietenia). Druhým dôvodom je, že samovznietenie uhlia patrí medzi najpreskúmanejšie procesy samovznietenia a je na ňom možné dobre ilustrovať prelínanie sa fyzikálnej a chemickej podstaty samovznietenia. Ale aj napriek tejto skutočnosti zostáva o procese samovznietenia uhlia veľa otázok na ktoré súčasná veda nepozná odpoveď.

Taraba (2003) delí pôsobenie kyslíka na uhlie na tri základný typy:

- **fyzikálne** (vratná, reverzibilná) adsorpcia kyslíka, ktorá je sprevádzaná najnižším tepelným efektom,
- interakcia kyslíka s vysoko **aktívnymi centrami** uhlia (je naopak spojená s najväčšími hodnotami vývinu tepla),
- **chemická** (nevratná, ireverzibilná) sorpcia kyslíka, ktorá predstavuje základný (dlhodobý) typ pôsobenia kyslíka na uhlie.

Jednotlivé typy interakcií kyslíka s uhlím neprebiehajú oddelene, ale sa pri oxidačnom procese navzájom prelínajú (Taraba 2003).

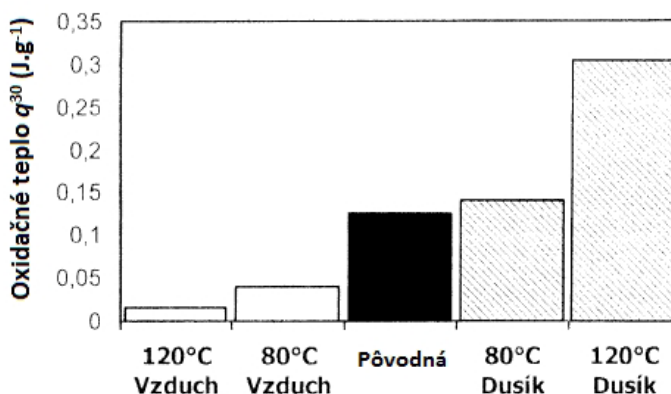
Zo všetkých popísaných typov pôsobenia kyslíka na uhlie je fyzikálna adsorpcia energeticky najmenej výhodná. Zmerané tepelné efekty sa pohybujú v rozmedzí od 0,1 do 0,7 J.ml⁻¹ (množstvo tepla v Jouloch uvoľnené pri adsorpcii 1 ml kyslíka na povrch uhlia). Kyslík je pri tomto type interakcií viazaný k povrchu uhlia len slabými (van der Waalsovými) silami a je ho možné z povrchu uhlia relatívne jednoducho uvoľniť (desorbovať) (Ponec a kol. 1968, Allardice a kol. 1971, Taraba 2003).

Bolo dokázané, že fyzikálna adsorpcia kyslíka je krátkodobý proces, ktorý je zjavne ukončený už počas dvadsiatich minút od prvého styku uhlia so vzdušným kyslíkom (napr. po jeho vyťažení) (Taraba 1990). Rozsah fyzikálnej adsorpcie pritom výrazne klesá s rastúcim obsahom vlhkosti uhlia a s narastajúcou teplotou. Pri teplotách nad 80 °C je fyzikálna adsorpcia kyslíka už prakticky zanedbateľná (Ismail a kol. 1980, Sarančuk 1982, Cronauer a kol. 1983 a Taraba 2003). Množstvo uvoľneného tepla fyzikálnou adsorpciou rovnako klesá s narastajúcim obsahom prchavej horľaviny v uhlí (Taraba 2003).

Uvedené skutočnosti podľa Tarabu (2003) dokazujú, že z hľadiska tvorby podmienok napomáhajúcich samovznieteniu uhlia je fyzikálna adsorpcia kyslíka na uhlie nepodstatný, doplnkový jav.

Najvyššia úroveň tepelných efektov, ktoré boli namerané pri laboratórnych výskumoch (až 26 J.ml⁻¹) sú prisudzované interakcii kyslíka s vysoko aktívnymi centrami

na povrchu uhlia. Aby sa takého aktívne centrá prejavili je spravidla potrebné dôkladné vyčistenie uhoľného povrchu alebo zvýšená teplota pri prvom kontakte uhlia s kyslíkom. K určitej aktivácii dochádza pri zahrievaní uhlia v inertnom prostredí, pričom miera aktivácie povrchu narastá s narastajúcou teplotou predúpravy. Názorne to ilustruje obr. 2-28, kde je reaktivita čerstvého uhlia s kyslíkom porovnávaná s reaktivitou rovnakého uhlia po jeho trojhodinovom termickom zatažení v inertnom dusíkovom prostredí s teplotou 80 a 120 °C. Pre porovnanie je na obr. 2-28 znázornené aj zníženie reaktivity vzorky s kyslíkom po rovnako dlhom termickom zatažení v prostredí vzduchu. Pre úplnosť je však potrebné dodať, že takáto aktivácia bola jednoznačne preukázaná len pre čierne uhlia. U hnedých uhlí vedie úplná strata vlhkosti (následkom termického zatažení vzorky) naopak k poklesu výslednej reaktivity uhlia s kyslíkom (Taraba 2003).



Obrázok 2-28 Závislosť oxidačného tepla na spôsobe predchádzajúcej úpravy vzorky čierneho uhlia (Taraba 2003)

Teplo q^{30} na obr. 2-28 vyjadruje množstvo uvoľneného tepla z jedného gramu uhlia počas 30 minútovej interakcie uhlia s kyslíkom pri teplote 30 °C a normálnom atmosférickom tlaku (Taraba 2003). V ďalšej časti tejto podkapitoly bude toto teplo označované ako teplo q^{30} alebo ako oxidačné teplo.

Možná podstata týchto vysoko aktívnych centier nie je zatiaľ úplne jasná. V literatúre (Krevelen a kol. 1957, Bhattacharyya, 1971 a Mazumdar kol. 1983 a Taraba 2003) sa ako miesta prednostnej reakcie kyslíka s uhlíkom uvádzajú funkčné skupiny obsahujúce kyslík. Pravdepodobnejšie však za tieto vysoko aktívne centrá môžeme považovať miesta uhoľného skeletu obsahujúce nespárovaný elektrón (voľný radikál) (Taraba 2003).

Pri chemickej interakcii sa vytvárajú medzi uhlím a kyslíkom chemické väzby a tento dej (chemická reakcia) je sprevádzaný tepelným efektom približne 11 ± 2 J.ml⁻¹. Tento tepelný efekt bol zistený ako pre hnedé, za laboratórnych teplôt, tak pre čierne uhlia za zvýšených teplôt (okolo 80 °C) (Winmill 1914, Lamplough 1912, Sevenster 1961, Černý a kol. 1971, Muzyczuk 1973, Sonreal a kol. 1974, Kaji a kol. 1987 a Taraba 2003). Pri teplotách okolo 30 °C je hodnota tepelného efektu oxidácie čiernych uhlí závislá od stupňa ich zuhoľnatenia (Taraba a kol. 1985, Taraba a kol. 1986, Taraba a kol. 1988 a Taraba 2003).

Chemická interakcia je výrazne dlhodobý proces, ktorý sprevádza uhoľnú hmotu po celú dobu jej existencie vo vzdušnom prostredí. Výrazné hodnoty tepelných efektov

a súčasne dlhodobé trvanie sú tak hlavnými dôvodmi, prečo je možné chemickú interakciu označiť za základný typ pôsobenia kyslíka na uhlie (Taraba 2003).

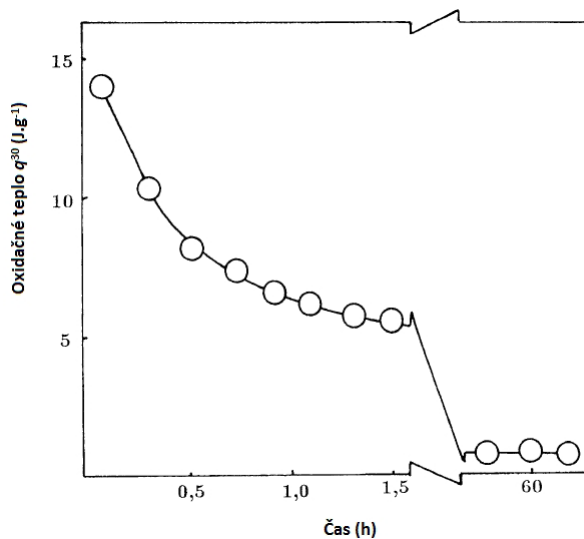
Priebeh a rozsah chemickej interakcie medzi uhlím a kyslíkom závisí od vonkajších faktorov, medzi ktoré patrí (Taraba 2003):

- čas,
- teplota,
- koncentrácia kyslíka,
- frakčné zloženie uhlia,
- vlhkosť a kontakt s vodou,
- stupeň zuhoľnatenia.

2.4.4.1.

Vplyv času na reaktivitu uhlia s kyslíkom

Kalorimetrické experimenty jednoznačne dokázali, že pôsobením kyslíka na čerstvé uhoľné vzorky dochádza k markantnému znižovaniu tepla uvoľneného chemickou reakciou medzi uhlím a kyslíkom. Uvedený pokles ilustruje obr. 2-29 (Taraba 2003).



Obrázok 2-29 Závislosť oxidačného tepla hnedého uhlia od času ($C^{daf} = 71,6\%$, zrnitosť 0,8 – 1 mm, vlhkosť 15 %) (Taraba 2003)

Z obrázka 2-29 vyplýva, že počiatočný výrazný pokles tepla uvoľneného reakciou medzi kyslíkom a uhlím sa po krátkom čase (rádovo desiatky hodín) utlmí a následne sa už mení len veľmi pozvoľne. Toto vypovedá o priblížení sa k určitému ustálenému, stacionárnemu stavu správania sa kyslíka s uhlím. Ani dlhodobé pôsobenie kyslíka však nevedie k nasýteniu všetkých reakčných miest na uhlí schopných chemicky reagovať s plynným kyslíkom pri teplote 30 °C. Napr. vzorka na obr. 2-29 vykázal ešte aj po tridsať dňovej expozícii vzduchom oxidačné teplo 0,4 J.g⁻¹ (Taraba 2003).

2.4.4.2.

Vplyv teploty na reaktivitu uhlia s kyslíkom

Vplyv teploty bol skúmaný na základe zmerania tepiel uvoľnených oxidáciou pri teplote 30 a 50 °C, pričom výsledky pre hnedé aj čierne uhlie jednoznačne preukázali nárast množstva uvoľneného tepla (q^{30}) s narastajúcou teplotou (Taraba 2003).

Vplyv teploty na chemickú reakciu medzi uhlím a kyslíkom sa najčastejšie analyzuje pomocou Arrheniovej rovnice (Sarančuk 1994 a Taraba 2003), ktorú je pre získané kalorimetrické dáta možné použiť v tvare [2.92] (Taraba 2003).

$$\ln(q^{30}) = \ln(A) - \frac{E}{R \cdot T} \quad (\text{J.g}^{-1}) \quad [2.92]$$

q^{30} : množstvo uvoľneného tepla z jedného gramu uhlia počas 30 minútovej interakcie uhlia s kyslíkom pri teplote 30 °C a normálnom atmosférickom tlaku (J.g^{-1})

A: frekvenčný faktor (-)

E: aktivačná energia (J.mol^{-1})

R: univerzálna plynová konštanta ($8,314 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T: teplota (K)

Význam Arrheniovej rovnice spočíva predovšetkým v možnosti vyčíslit hodnotu aktivačnej energie, ktorú si je zjednodušene možné predstaviť ako energetickú bariéru, ktorú je potrebné prekonať, aby daná reakcia mohla prebehnúť (Moor 1981). Čím je hodnota aktivačnej energie nižšia, tým by reakcia mala prebiehať jednoduchšie. Na tomto mieste je však potrebné upozorniť, že reakcia uhlia s kyslíkom (ako typická heterogénna reakcia) predstavuje efektívnu aktivačnú energiu a zahŕňa nie len chemické reakcie, ale aj proces transportu (difúzie) kyslíka k vlastným reakčným centráram (Taraba 2003).

Hodnoty aktivačných energií z kalorimetrických meraní sa pohybujú v rozmedzí 15 až 50 kJ.mol^{-1} . Hodnota aktivačnej energie 50 kJ.mol^{-1} pritom predstavuje takmer zdvojnásobenie vývinu tepla pri náraste teploty o 10 °C (Taraba 2003).

Hodnoty aktivačných energií sa v niektorých štátoch (napr. Poľsku) používajú ako ukazovateľ pre posúdenie náchylnosti uhlia k samovznieteniu. Uhlia s aktivačnou energiou pod 34 kJ.mol^{-1} sú klasifikované ako vysoko náchylné k samovznieteniu a uhlia s aktivačnou energiou nad 67 kJ.mol^{-1} sú považované za odolné voči samovznieteniu (Muzyczuk a kol. 1985, Cygankiewicz 2000 a Taraba 2003).

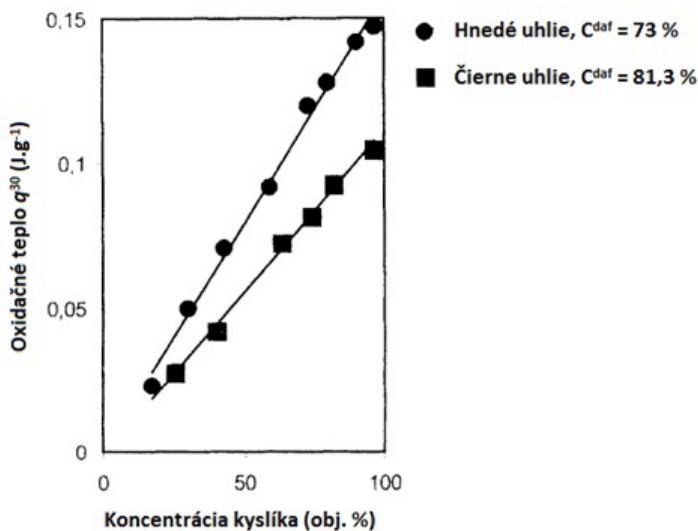
Na tomto mieste je však potrebné upozorniť, že výsledky najnovších výskumov (napr. Šimon 2006 a Šimon a kol. 2014) dokazujú, že aktivačná energia (sama o sebe ako taká) nemá fyzikálny zmysel a preto je potrebné brať do úvahy všetky kinetické parametre (nie len aktivačnú energiu). Vedecká štúdia, ktorá by posúdila sklon uhlia k samovznieteniu na základe všetkých kinetických parametrov nebola zatiaľ zverejnená. Takáto vedecká štúdia by priniesla viac svetla do presnejšieho a exaktnejšieho porozumenia celého procesu samovznietenia uhlia.

2.4.4.3.

Vplyv koncentrácie kyslíka na reaktivitu uhlia s kyslíkom

Koncentrácia kyslíka v oxidačnej zmesi je dôležitým vonkajším faktorom ovplyvňujúcim chemickú reakciu uhlia s kyslíkom.

Exaktnejšie povedané, rýchlosť oxidácie uhlia závisí na parciálnom tlaku kyslíka a nie na jeho koncentrácii. Z experimentálnych údajov znázornených na obr. 2-30, vyplýva lineárny nárast tepla q^{30} s narastajúcou koncentráciou (parciálnym tlakom) kyslíka. Akokoľvek bola lineárna závislosť očakávaná, za zdôraznenie stojí jeden dôsledok a to, že oxidačné teplo sa evidentne uvoľňuje aj pri malých koncentráciách (parciálnych tlakoch) kyslíka a úplne sa prestane uvoľňovať až pri nulovej koncentrácii kyslíka (Taraba 2003).



Obrázok 2-30 Závislosť oxidačného tepla q^{30} na koncentrácii kyslíka v oxidačnej zmesi pri normálnom tlaku (Taraba 2003)

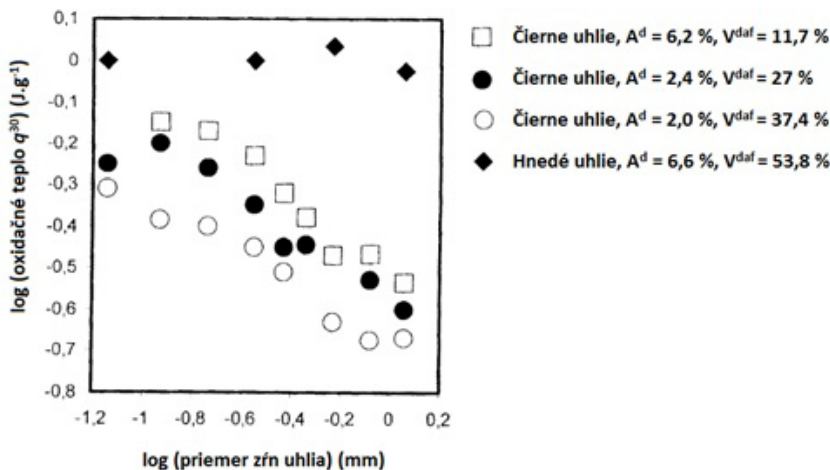
Podľa Tarabu (2003) je preto z pohľadu nebezpečenstva vzniku samovznietenia potrebné považovať za medznú koncentráciu kyslíka až úplne inertné prostredie. Tento záver je správny, pokiaľ sa týka posúdenie možnosti priebehu chemickej reakcie medzi uhlím a kyslíkom. Na druhej strane je však potrebné zobrať do úvahy, že zníženie koncentrácie (parciálneho tlaku) kyslíka sa významným spôsobom prejaví na poklese oxidačného tepla, následkom čoho významným spôsobom klesá pravdepodobnosť vzniku samovznietenia.

2.4.4.4.

Vplyv frakčného zloženia na reaktivitu uhlia s kyslíkom

Z výsledkov vedeckej práce Tarabu (2003) vyplýva, že frakčné zloženie uhoľnej hmoty má významný vplyv na priebeh (rýchlosť) chemickej reakcie medzi uhlím a kyslíkom. Závislosť oxidačného tepla od priemeru zŕn uhlia ilustruje obr. 2-31. Z citovaného obrázku vyplýva, že s narastajúcim priemerom zŕn čierneho uhlia teplo q^{30} klesá, naproti tomu v prípade hnedého uhlia je teplo q^{30} od priemeru zŕn prakticky nezávislé. Taraba (2003) uvedený rozdiel medzi hnedým a čiernym uhlím vysvetľuje rozdielmi v objeme pórov medzi čiernym a hnedým uhlím. Podľa citovaného autora vykazujú hnedé uhlie (a oxidačne ovplyvnené čierne uhlie) väčší objem pórov (nad $0,06 \text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}$) ako uhlie čierne

(pod $0,02 \text{ ml.g}^{-1}$). Uvedenú skutočnosť považuje za dôvod, prečo môže kyslík prechádzať celým objemom hnedouhoľných zŕn a teda aj nezávislosti tepla q^{30} od priemeru zŕn hnedého uhlia.



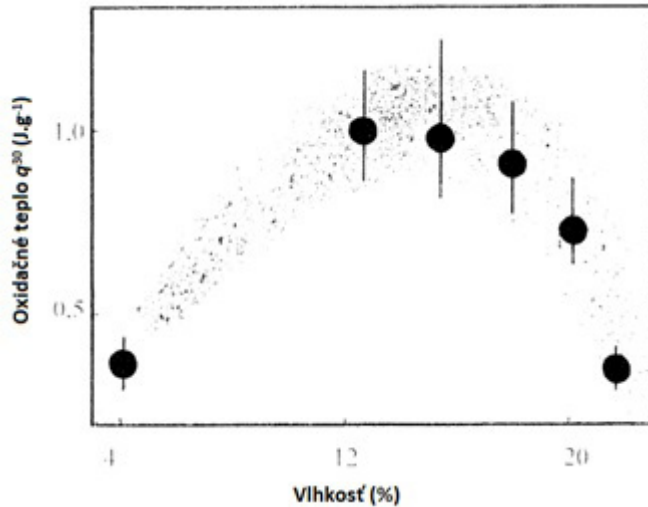
Obrázok 2-31 Závislosť oxidačného tepla q^{30} od stredného priemeru zŕn vzoriek uhlia (Taraba 2003)

2.4.4.5.

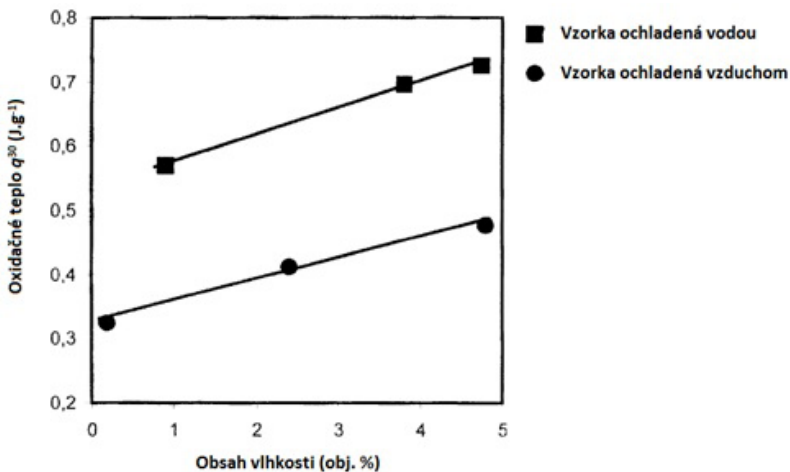
Vplyv vlhkosti a kontaktu s vodou na reaktivitu uhlia s kyslíkom

Z výsledkov vedeckej práce Tarabu (2003) vyplýva, že vplyv vlhkosti na oxidačné teplo q^{30} závisí od stupňa zuhoľnatenia uhlia. V prípade čiernych uhlí narastajúci obsah vlhkosti znižuje hodnotu oxidačného tepla q^{30} zatiaľ čo hnedé a oxidačne modifikované čierne uhlia vykazujú opačný trend. Hnedé uhlia teda vykazujú vyššiu hodnotu tepla q^{30} vo vlhkom ako vo vysušenom stave. Podľa Tarabu (2003) však tento trend neplatí v celom rozsahu vlhkosti hnedého uhlia, tak ako to ilustruje obr. 2-32. Vlhkosť pri ktorej je oxidačná rýchlosť maximálna sa podľa Chen a kol. (1993) a Tarabu (2003) označuje ako kritický obsah vlhkosti (pohybuje sa okolo 15 %).

Okrem samotnej vlhkosti má na nárast reaktivity uhlia s kyslíkom vplyv aj predchádzajúci kontakt uhlia s vodou (tento vplyv narastá s narastajúcou teplotou). Za účelom exaktného posúdenia miery tohto vplyvu bol vykonaný experiment v ktorom bolo uhlie zahriate na teploty (postupne 100, 150, 200 a 250 °C) a následne schladené prúdom vody. Uhasené uhlie bolo vysušené vo vákuu pri teplote 55 °C. Porovnávacia (referenčná) vzorka bola ohriata na rovnaké teploty, ale po zahriatí nebola schladená vodou, ale vzduchom. Získané údaje jednoznačne dokazujú vyššiu reaktivitu s kyslíkom v prípade uhlia ochladeného vodou, ako uhlia schladeného vzduchom. Nárast oxidačného tepla q^{30} bol tým vyšší, čím na vyššiu teplotu bola vzorka uhlia ohriata. Rozdiel medzi oxidačným teplom q^{30} vzorky ochladenej vzduchom a vodou ilustruje obr. 2-33 (Taraba 2003).



Obrázok 2-32 Závislosť oxidačného tepla q^{30} od vlhkosti oxidačne modifikovaného uhlia ($C^{daf} = 70,8\%$, $H^{daf} = 2,7\%$, zrnitosť 0,6 – 1,0 mm) (Taraba 2003)



Obrázok 2-33 Závislosť oxidačného tepla q^{30} od obsahu vlhkosti hnedého uhlia ($V^{daf} = 55,6\%$, $C^{daf} = 71,9\%$, vzorka bola počas jednej hodiny udržovaná na teplote 250 °C) (Taraba 2003)

Z vyššie uvedeného vyplýva, že na sklon uhlia k samovznieteniu má významný vplyv jeho teplotno-vlhkostná minulosť. Uvedená skutočnosť významným spôsobom sťažuje posúdenie sklonu vzorky uhlia k samovznieteniu v konkrétnych prípadoch. Príkladom môže byť požiar skladu uhlia, ktorý nebol spôsobený samovznietením, nakoľko predmetné uhlie nemalo sklon k samovznieteniu. Požiar by však spôsobil nárast teploty uhlia v celom sklade (aj uhlia, ktoré neprišlo bezprostredne do kontaktu s požiarom) a následný protipožiarňny zásah jeho namočením vodou. Následkom tejto skutočnosti by sa zvýšila reaktivita uhlia s kyslíkom. Odobratie a analýza takýchto vzoriek môže viesť k chybnému záveru o sklone skúmaného uhlia k samovznieteniu ešte pred vznikom požiaru a namočením vodou. Rovnakou chybou môže byť odber a analýza vzoriek uhlia (z rovnakého

zdroja), ktoré sa nenachádzalo na mieste vzniku požiaru. Takáto vzorka mohla mať inú teplotno-vlhkostnú minulosť a preto môže vykazovať aj iný sklon k samovznieteniu.

Jediným riešením, ako posúdiť sklon konkrétneho uhlia odobratého z miesta vzniku požiaru (pre potreby zisťovania príčin vzniku požiaru) je odber vzoriek pred samotným protipožiarnym zásahom. V takomto prípade je potrebné zmerať a zaznamenať teplotu vzorky a túto uchovať v plynotesne uzatvorenej sklenenej nádobe až do vykonania laboratórnej analýzy. V tomto prípade je vzorka uchránená od pôsobenia jedného faktora (hasiaca voda), ktorý na ňu nepôsobil pred vznikom požiaru. Aj v tomto prípade je však potrebné zohľadniť zataženie vzorky zvýšenou teplotou počas požiaru a aj možnosť diferenciálneho zataženia vodou (ešte pred vznikom požiaru) v sklade (časť uhlia mohla byť do skladu privezená v iný deň alebo miestne zmáčanie uhlia v časti skladu – napr. vplyvom lokálnej netesnosti strechy a pod.). Ak sa vzorka z miesta vzniku požiaru takýmto spôsobom neodoberie, prípadne ak v čase prjazdu hasičskej jednotky (a zisťovateľa príčin vzniku požiarov) už horí celý sklad uhlia je možné vykonať analýzu aj zo vzoriek z identického zdroja (o ktorom vieme, že nebolo vystavené pôsobeniu zvýšenej tepoty a vlhkosti). Pri interpretácii získaných údajov je však potrebné zachovať vysokú mieru opatrnosti. Meranie je potrebné vykonať pre teplotne a vlhkosťne neovplyvnenú vzorku, ako aj pre vzorku zataženú zvýšenou teplotou a následne ochladenú vodou. Takéto laboratórne skúmanie môže priniesť tri výsledky:

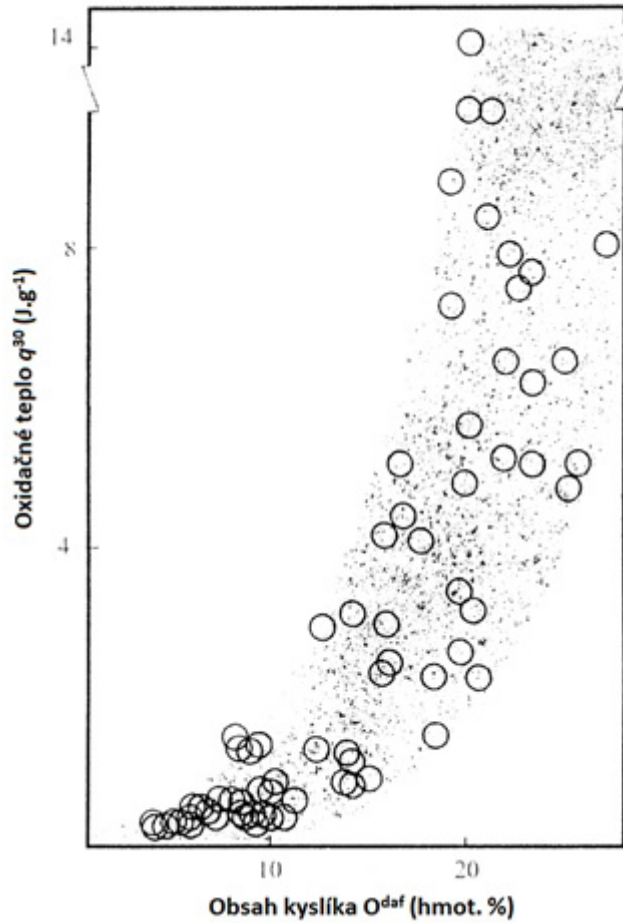
1. pôvodná aj zvýšenou teplotou a vodou ovplyvnená vzorka vykazujú sklon k samovznieteniu (v tomto prípade je možné prijať hypotézu o sklone k samovznietenia uhlia, ktoré vystupovalo ako palivo v predmetnom požiari),
2. pôvodná aj zvýšenou teplotou a vodou ovplyvnená vzorka nevykazuje sklon k samovznieteniu (v tomto prípade je možné zamietnuť hypotézu o sklone k samovznieteniu uhlia, ktoré vystupovalo ako palivo v predmetnom požiari),
3. pôvodná vzorka nevykazuje sklon k samovznieteniu, zatiaľ čo zvýšenou teplotou a vodou zatažená vzorka sklon k samovznieteniu vykazuje (v tomto prípade nie je na základe laboratórnych skúšok možné hypotézu o sklone uhlia, ktoré v predmetnom požiari vystupovalo ako palivo, k samovznieteniu potvrdiť ani zamietnuť).

Na tomto mieste je však potrebné upozorniť, že uvedený postup je aplikovateľný pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov. V prípade vyšetrovania príčin vzniku požiarov (vyšetrovanie trestného činu) nemusí súd akceptovať výsledky skúšok vzoriek odobratých z iného miesta ako miesta vzniku požiaru. Na druhej strane je však na základe vyššie uvedených faktov možné spochybniť aj výsledky skúšok zo vzoriek odobratých z miesta vzniku požiaru (ak tieto boli preukázateľne ovplyvnené zvýšenou teplotou a/alebo kontaktom s vodou).

2.4.4.6.

Vplyv stupňa zuhoľnatia na reaktivitu uhlia s kyslíkom

Je všeobecne známe, že reaktivita hnedých uhlí s kyslíkom je podstatne výraznejšia ako u uhlí čiernych. Táto skutočnosť je znázornená na obr. 2-34. Ako ukazovateľ zuhoľnatia je na obr. 2-34 použitá hodnota obsahu kyslíka v horľavine uhlia O^{daf} . Aj napriek značnému rozptylu je z obr. 2-34 zrejماً vzostupná tendencia hodnôt oxidačného tepla q^{30} s poklesom obsahu kyslíka, teda so vzrastajúcim stupňom zuhoľnatia uhoľnej hmoty (Taraba 2003).



Obrázok 2-34 Závislosť oxidačného tepla q^{30} od obsahu kyslíka v horlavine uhlia (zrinitosť uhlia 0,06 – 0,14 mm, vlhkosť uhlia – ustálený stav pri relatívnej vlhkosti vzduchu 80%) (Taraba 2003)

3 Horľavé látky

Pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov môžu byť horľavé látky definované ako látky, ktoré za podmienok požiaru horia. Najjednoduchšie delenie horľavých látok je podľa skupenstva na **plynné**, **kvapalné** a **tuhé**. Požiarne riziko (vyjadrené rýchlosťou uvoľňovania tepla a jednoduchosťou iniciácie) horľavých látok vo všeobecnosti narastá od tuhých cez kvapalné po plynné.

Horľavý plyn je v zmysle § 2 ods. 1 vyhl. MV SR č. 124/2000 Z. z. definovaný ako plyn alebo zmes plynov, ktorý spĺňa súčasne tieto podmienky:

- a) má pri teplote 50 °C tlak pár vyšší ako 300 kPa alebo pri teplote 20 °C a atmosférickom tlaku 101 kPa je úplne plynný,
- b) možno určiť jeho bod vznietenia alebo vytvára so vzduchom výbušnú zmes.

Horľavá kvapalina je v zmysle § 3 ods. 1 vyhl. MV SR č. 96/2004 Z. z. definovaná ako látka, ktorá spĺňa súčasne tieto podmienky:

- a) pri atmosférickom tlaku 101,3 kPa a pri teplote 20 °C nie je úplne plynná a
 1. je kvapalná podľa kritéria uvedeného v skúšobnom postupe podľa osobitného predpisu,
 2. nie je tuhá a nie je ani pastou podľa kritéria uvedeného v skúšobnom postupe pre penetrometrickú skúšku podľa osobitného predpisu, alebo
 3. pri teplote 20 °C sa začína topiť,
- b) pri teplote 50 °C má tlak nasýtených pár najviac 300 kPa,
- c) má bod vzplanutia určený podľa postupu uvedeného
 1. v slovenskej technickej norme alebo
 2. v osobitnom predpise, najviac však 250 °C a
- d) možno určiť jej bod horenia.

Za **tuhú horľavú látku** je v zmysle § 2 písm. a) vyhl. MV SR č. 258/2007 Z. z. považovaný uvädnutý krm, seno, slama a iné suché, pokosené steblovité rastliny alebo stonkové rastliny, tuhé palivá, vyťažená drevná hmota a drevná hmota spracovaná na sortimenty výrobkov.

Aj keď boli vyššie uvedené definície horľavých látok (plynov, kvapalín a tuhých látok) vytvorené pre potreby citovaných právnych predpisov, môže byť definícia horľavého plynu (a s určitým obmedzením) aj horľavej kvapaliny považovaná za relatívne univerzálnu. Obmedzenie v uvedenej definícii horľavej kvapaliny sa týka penetrometrickej skúšky, nakoľko pasta sa za podmienok reálneho požiaru bude správať ako kvapalina. Ďalšie obmedzenie sa týka bodu vzplanutia, nakoľko aj kvapalina s bodom vzplanutia nad 250 °C (ak kvapalina alebo pasta má nižší bod vzplanutia ako teploty dosahované počas bežných vnútorných požiarov) sa za podmienok reálneho požiaru zapáli a bude uvoľňovať teplo.

Vyššie uvedená definícia tuhej horľavej látky, resp. ich vymenovanie je však potrebné chápať striktnie ako definíciu pre potreby vyhl. MV SR č. 258/2007 Z. z. Táto definícia nemôže byť považovaná za univerzálnu definíciu tuhých horľavých látok a rovnako nie je vhodná pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov.

Pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov je vhodnejšie delenie horľavých látok na:

- **bežné horľavé látky** (ktoré sa na mieste vzniku požiaru a v celom požiarom úseku vyskytujú bežne),
- **akcelerátory požiaru** (horľavé látky, ktoré úmyselne do požiarneho úseku doniesol páchateľ s úmyslom uľahčiť spôsobenie požiaru a/alebo urýchliť jeho šírenie).

Z hľadiska uvedeného delenia neexistuje žiadny chemický ani fyzikálny rozdiel medzi bežnou horľavou látkou a akcelerátorom požiaru, rozdiel je len v úmysle jeho použitia. Najčastejšie sa ako akcelerátor požiaru používajú horľavé kvapaliny, typicky automobilový benzín alebo Molotovov koktail (zmes automobilového benzínu a motorového oleja). Ak sa napr. automobilový benzín nachádza v garáži, kde vznikol požiar (napr. z technickej príčiny) je tento považovaný za bežnú horľavú látku. V prípade, že nebol skladovaný v súlade s požiadavkami vyhl. MV SR č. 96/2004 Z. z. môžu byť voči zodpovednej osobe vyvodené dôsledky (v zmysle zákona o požiarnej ochrane alebo trestného zákona), ale pokiaľ nebol do tejto garáže donesený s úmyslom uľahčiť spôsobenie požiaru a/alebo urýchliť jeho šírenie musí sa považovať za bežnú horľavú látku. Ak však v tej istej garáži rozliat ten istý benzín páchateľ s cieľom spôsobiť požiar a/alebo urýchliť jeho šírenie musí byť táto horľavá látka považovaná za akcelerátor požiaru. Akcelerátor požiaru môže okrem uľahčenia spôsobenia a urýchlenia šírenia požiaru byť použitý aj na ovplyvnenie smerov jeho šírenia.

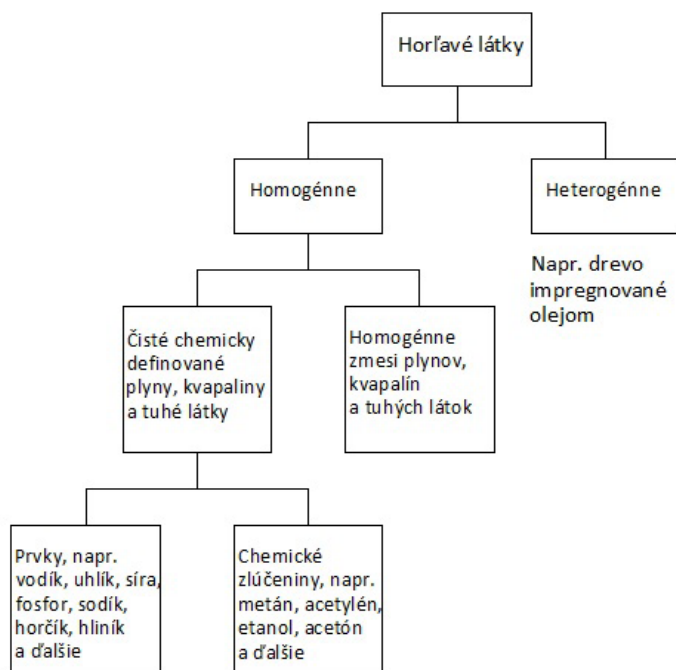
Orlíková a Štroch (1999) delia horľavé látky na **prírodné** a **technické**. Medzi prírodné horľavé látky zaraďujú napr. zemný plyn, ropu, uhlie, obilie, drevo a ďalšie prírodné produkty. Technické horľavé látky delia na dve podskupiny. Do prvej podskupiny zaraďujú horľavé látky vzniknuté spracovaním prírodných produktov, napr. spracovaním ropy sa vyrába benzín, motorová nafta, ľahký vykurovací olej, spracovaním uhlia sa vyrába koks, spracovaním obilia múka, pri stavebno-stolárskej výrobe vzniká z rastlého dreva drevný prach a pod. Do druhej podskupiny zaraďujú technické horľaviny vyrobené syntézou (vyrobené vo väčšine prípadov tiež z ropy), kde zaraďujú napr. polyvinylchlorid, polyuretány, polyetylén, syntetický kaučuk, farby, riedidlá, rozpúšťadlá a ďalšie látky.

Delenie horľavých látok podľa ich fyzikálno-chemických vlastností je znázornené na obr. 3-1.

Čisté chemicky definované látky (látky definované chemickou značkou alebo vzorcom) sa delia na prvky a zlúčeniny. Jediným horľavým prvkom v plynnom skupenstve je vodík. Horľavé látky v kvapalnom skupenstve nie sú reprezentované žiadnym prvkom, lebo kvapalné prvky ortuť a bróm nie sú horľavé. Najväčšie zastúpenie medzi horľavými prvkami majú tuhé prvky. Z nekovov sú najvýznamnejšie horľavé prvky uhlík, síra a fosfor. Z kovov medzi horľavé prvky patria predovšetkým alkalické kovy a kovy alkalických zemín, ale napr. aj hliník. Za určitých okolností sú horľavé aj niektoré ďalšie kovy, napr. železo, chróm a mangán (v jemnom práškovom stave sú dokonca samozápalné – pyroforické). Nehorľavé sú ušľachtilé kovy (napr. zlato a striebro) (Orlíková a Štroch 1999).

Najvýznamnejšie horľavé, chemicky definované zlúčeniny v plynnom stave sú prvé členy homologických radov alifatických uhľovodíkov (napr. metán alebo acetylén). Príklad chemicky definovaných horľavých kvapalín môžeme opäť čerpať zo skupiny organic-

kých látok. Jedná sa predovšetkým o nepolárne kvapaliny, napr. benzén, toluén, xylény a oktán. Typickým príkladom polárnych horľavých kvapalín sú alkoholy (napr. metanol, etanol a propanol), aldehydy (napr. etanál – acetaldehyd) a ketóny (napr. dimetylketón – acetón). Medzi chemicky definované tuhé horľavé látky patria predovšetkým organické zlúčeniny, ktoré sa ďalej delia na nízkomolekulové látky napr. polyaromatické uhľovodíky (napr. naftalén a antracén) a makromolekulové látky (napr. polyetylén, polypropylén a polyuretány) (Orlíková a Štroch 1999).



Obrázok 3-1 Rozdelenie horľavých látok (Orlíková a Štroch 1999)

Horľavé homogénne zmesi sa vyskytujú opäť vo všetkých troch skupenstvách. Plynné skupenstvo predstavujú prírodné a technické plynné zmesi s variabilným zastúpením horľavých plynov. Príklad zloženia vybraných prírodných a technických plynov je znázornený v tabuľke 3-1. Homogénne zmesi horľavých kvapalín sa delia na roztoky pravé a nepravé. Medzi pravé roztoky patria produkty destilácie ropy (napr. benzín), dechtu a roztok etanolu s vodou. K nepravým (tzv. koloidným) roztokom horľavých látok patria napr. tuky a vosky. Horľavé homogénne zmesi tuhých látok predstavujú tuhé roztoky. K nim patria roztoky prírodné (napr. zemný vosk), tuhé roztoky vzniknuté spracovaním ropy (napr. parafíny a asfalty) a zliatiny horľavých kovov (napr. elektrón – 90 % horčík, hliník, zinok a mangán) (Orlíková a Štroch 1999).

Tabuľka 3-1 Zloženie vybraných prírodných a technických plynov

Plyn	Zloženie plynu (obj. %)							
	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	C _n H _{2n}	N ₂	H ₂ S	O ₂
Zemný plyn	–	0,2	–	94,0	2,5	3,3	–	–
Vodný plyn z koksu	37,0	6,5	50,0	0,4	–	5,5	0,3	0,2
Generátorový plyn z koksu	27,5	5,5	13,5	0,5	–	52,6	0,2	0,2
Koksárenský plyn	8,0	2,5	52,7	24,0	3,2	9,0	Stopy	0,6
Vysokopecný plyn	25,0	16,5	4,5	–	–	54,0	–	–
Plyn z pyrolýzy ropy	0,8	0,5	14,0	41,5	43,0	0,2	–	–

Prameň: Orlíková a Štroch (1999)

Orlíková a Štroch (1999) ďalej delia horľavé látky podľa kritérií používaných v technickej praxi. Medzi uvedené kritériá parí predovšetkým teplota vzplanutia horľavých kvapalín a trieda požiaru.

Podľa teploty vzplanutia sa v zmysle vyhl. MV SR č. 96/2004 Z. z. delia horľavé kvapaliny do štyroch tried nebezpečnosti, tak ako to ilustruje tabuľka 3-2.

Tabuľka 3-2 Členenie horľavých kvapalín

Trieda nebezpečnosti	Bod vzplanutia (°C)
I.	do 21
II.	nad 21 do 55
III.	nad 55 do 100
IV.	nad 100 do 250

Prameň: Vyhl. MV SR č. 96/2004 Z. z.

Podľa triedy požiaru sa horľavé látky delia na A (tuhé horľavé látky), B (horľavé kvapaliny), C (horľavé plyny), D (horľavé plyny) a F (kuchynské oleje a tuhy). Uvedené delenie sa používa predovšetkým na označenie vhodnosti hasiaceho prístroja, nakoľko umožňuje rýchlu orientáciu používateľa. Niektoré zdroje uvádzajú aj triedu požiaru E (elektrické zariadenia pod napätím).

3.1.

Horľavé plyny

Pred popisom vlastností horľavých plynov je potrebné zdôrazniť, že z fyzikálneho hľadiska neexistuje podstatný rozdiel medzi (horľavým) plynom a parami (horľavej) kvapaliny. Rozdiel medzi plynom a parou je len ten, že pary možno skvapalniť zvyšovaním tlaku počas izotermického deja, ale plyny môžu byť skvapalnené až pri teplote nižšej ako kritickej teplote.

Horľavé plyny vykazujú, v porovnaní s horľavými kvapalinami a tuhými horľavými látkami, v správaní počas podmienok požiaru dve špecifická. Prvým špecifikom je, že horľavý plyn nie je možné charakterizovať rýchlosťou horenia ako látkovou charakteristikou, ale táto závisí výlučne od rýchlosti uvoľňovania plynu zo zdroja (napr. tlaková nádoba

alebo rozvodné potrubie) do prostredia. Horľavé plyny sú ďalej špecifické tým, že počas podmienok požiaru predstavujú vysoké riziko explózie. Explózia horľavého plynu môže nastať dvomi základnými mechanizmami. Prvý nastáva v prípade, že horľavý plyn unikne do prostredia (napr. požiarneho úseku), kde vytvorí výbušnú zmes s koncentráciou medzi dolnou a hornou medzou výbušnosti. Po iniciácii takejto zmesi nastane explózia. Tento dej má rovnakú chemickú podstatu ako požiar a preto sa nazýva aj chemický výbuch horľavého plynu (k podobnej explózii môže dôjsť pri iniciovaní pár horľavých kvapalín, ktoré dosiahli koncentráciu medzi dolnou a hornou medzou výbušnosti). Iným mechanizmom výbuchu je tepelné zaťaženie tlakovej nádoby. Následkom narastajúcej teploty narastá tlak vo vnútri tlakovej nádoby. Pri dosiahnutí určitej kritickej teploty (závisí od chemického zloženia horľavého plynu a mechanických vlastností tlakovej nádoby) dôjde k jej deštrukcii a výbuchu. Tento dej má fyzikálnu podstatu a nazýva sa aj fyzikálny výbuch (podobným mechanizmom môže explodovať aj hermeticky uzatvorená nádoba naplnená kvapalinou). Explózia daným mechanizmom môže nastať bez ohľadu na horľavosť plynu alebo kvapaliny.

Prakticky pri každom požiari sú dosiahnuté teploty potrebné na fyzikálnu explóziu tlakovej nádoby naplnenej plynom (pre porovnanie počas bežného vnútorného požiaru sa bežne dosahujú teploty aj nad 1000 °C, zatiaľ čo vyhl. MV SR č. 124/2000 Z. z. v § 16 ods. 5 vyžaduje, aby teplota na povrchu tlakovej nádoby naplnenej horľavým plynom neprekročila 50 °C). Pri zaťažení tlakovej nádoby naplnenej plynom, zvýšenou teplotou počas požiaru sú možné dve alternatívy. Prvou je, že tlaková nádoba je chránená poistným ventilom. V tomto prípade pri dosiahnutí reakčnej teploty poistného ventilu dôjde k vypusteniu obsahu tlakovej nádoby do priestoru. Ak sa v tlakovej nádobe nachádzal horľavý alebo horenie podporujúci plyn má to za následok nárast intenzity požiaru (v závislosti od množstva horľavého plynu v tlakovej nádobe). Na tomto mieste je však potrebné upozorniť, že poistné ventily obyčajne nie sú dimenzované na teploty požiaru, preto sa môže stať (hlavne pri veľkých tlakových nádobách s vysokým tlakom), že po reakcii poistného ventilu začne unikajúci plyn horieť a ďalej ohrievať tlakovú nádobu až na teplotu pri ktorej nastane jej fyzikálna explózia (otvor poistného ventilu môže byť príliš malý na to, aby umožnil vypustenie obsahu fľaše pri tak vysokej teplote v dostatočne krátkom čase). Druhá alternatíva je, keď tlaková nádoba nie je chránená poistným ventilom. V tomto prípade je potrebné očakávať pri vystavení tlakovej nádoby teplote typickej pre požiar fyzikálnu explóziu. Ak sa v tlakovej nádobe nachádzal horľavý plyn (za predpokladu dostatočného prístupu oxidačného prostriedku do požiarneho úseku) alebo horenie podporujúci plyn (za predpokladu vysokej teploty v požiarnej časti úseku a koncentrácie rozkladných produktov horenia nad hornou medzou výbušnosti) môže jeho uvoľnenie do požiarneho úseku spôsobiť chemickú explóziu.

Horľavé plyny (najmä skvapalnené) používajú páchatelia ako akcelerátory požiaru (aj keď menej často, ako horľavé kvapaliny). Typickým prípadom použitia horľavého plynu ako akcelerátora požiaru je nastriekanie skvapalneného propán-butánu z tlakovej nádoby (používanej na plnenie cigaretových zapaľovačov) do motorovej časti vozidla (cez prednú masku alebo z vrchnej strany kapoty od stieračov) a jeho následné zapálenie.

Pri posudzovaní požiarneho rizika horľavého plynu a jeho správania sa pred a počas požiaru je veľmi dôležitým parametrom jeho relatívna hustota (v porovnaní so vzduchom). Horľavé plyny ťažšie ako vzduch majú tendenciu držať sa pri zemi, šíriť sa tesne nad zemou a hromadiť v nízko položených (resp. podzemných) priestoroch. Typickým príkladom takýchto plynov je propán-bután. Naopak horľavé plyny ľahšie ako vzduch majú tendenciu

uniknúť do atmosféry a preto sú vo všeobecnosti považované za bezpečnejšie, ako horľavé plyny ťaženie ako vzduch. Typickým príkladom takého plynu je vodík. Vodík má však z hľadiska protipožiarinej bezpečnosti jednu veľmi nebezpečnú vlastnosť, ktorou je fakt, že atóm vodíka (resp. jeho dvojatómová molekula) je najmenším atómom (dvojatómovou molekulou) z všetkých prvkov. Tento fakt má za následok, že vodík dokáže jednoducho a vo veľkom množstve unikať aj cez nepatrné netesnosti.

Z uvedených mechanizmov explózie (horľavých) plynov predstavuje výnimku acetylén (etín) v ktorom sú atómy uhlíka viazané trojitou väzbou, ktorá je nestabilná a pri kompresii acetylénu tlakom približne 200 kPa dochádza k jej exotermickému rozkladu, ktorý môže viesť až k explózii.

Pre potreby posudzovania požiarného rizika a zisťovania príčin vzniku požiarov sú najdôležitejšie nasledovné požiarnotechnické charakteristiky horľavých plynov:

- koncentračné medze výbušnosti,
- teplota vznietenia a minimálna iniciačná energia,
- spalné teplo a výhrevnosť,
- množstvo vzduchu (kyslíka) potrebné na dokonalé spálenie jednotkového množstva horľavého plynu.

Dolná koncentračná medza horľavosti je minimálna koncentrácia horľavého plynu (alebo pary horľavej kvapaliny) v zmesi s oxidačným prostriedkom (najčastejšie vzduchom), ktorá môže byť za podmienok skúšky zapálená a horieť plameňom. **Horná koncentračná medza horľavosti** je maximálna koncentrácia horľavého plynu (alebo pary horľavej kvapaliny) v zmesi s oxidačným prostriedkom (najčastejšie vzduchom), ktorá môže byť za podmienok skúšky zapálená a horieť plameňom. Rozdiel medzi hornou a dolnou medzou horľavosti sa nazýva koncentračný rozsah horľavosti.

Koncentračné medze horľavosti môžu byť prakticky stotožnené s koncentračnými medzami výbušnosti (rozdiel je len vo veľkosti priestoru v ktorom je daná medza dosiahnutá – ak je napr. dolná medza horľavosti dosiahnutá v oblasti napr. do 20 cm od miesta úniku plynu, tak po jeho iniciácii nasleduje horenia plameňom, ale ak je dolná medza horľavosti dosiahnutá v celom priestore s objemom niekoľko desiatok m³ tak po iniciácii bude nasledovať explózia). Koncentračné medze výbušnosti sú dôležitým parametrom pre posúdenie možnosti vzniku výbuchu horľavého plynu alebo pary horľavej kvapaliny v priestore. Na tomto mieste je však potrebné upozorniť, že koncentračné medze výbušnosti sa stanovujú normalizovaným skúšobným postupom, ktorý sa môže od reálnych podmienok líšiť (napr. teplotou plynu, rýchlosťou a typom prúdenia plynu (laminárne alebo turbulентné) energiou iniciačného zdroja). Dolná koncentračná medza výbušnosti môže byť ďalej znížená napr. prítomnosťou aj malého množstva rozvíreného horľavého prachu (vytvorí sa hybridná zmes). Okrem toho je potrebné počítať s nehomogénnym rozptýlením horľavého plynu v priestore (najmä vo fáze jeho úniku a tesne po nej, kedy ešte nie je dostatočný čas na jeho dokonalé rozptýlenie v priestore). Toto všetko sú dôvody prečo pri zisťovaní príčin vzniku požiarov nemôže byť vyvodený záver, že k explózii horľavého plynu nemohlo dôjsť len na základe údajov zo snímača koncentrácie horľavého plynu a prečo je potrebné zobrať do úvahy aj ostatné faktory.

Dolná a horná koncentračná medza výbušnosti plynov sa vyjadruje v obj. % (objemové percentá). Alternatívne sa môžeme stretnúť s jednotkou ppm (z anglického parts per million – milióntina z celku alebo z latinského pars per milion). Aj keď podľa normy ISO 80000-1:2009, sa jedná o technicky nesprávnu jednotku, v technickej praxi sa bežne využíva – uvádza ju napr. aj NV SR 355/2006 Z. z. V praxi však môže jednotka

ppm vyjadrovať dva rôzne pomery. V prvom prípade je vyjadrením jednotky $\mu\text{l.l}^{-1}$ kedy udáva koľko μl plynu sa nachádza v jednom litri plynnej zmesi (napr. vzduchu). V tomto prípade sa skutočne jedná o jednotku ktorá z fyzikálneho hľadiska nemôže byť považovaná za úplne exaktnú (objemová rozťažnosť rôznych plynov je rôzna a pre exaktné vyjadrenie koncentrácie plynu týmto spôsobom je potrebné uvádzať aj teplotu pri akej bola zmeraná). Na druhej strane môže byť ppm aj vyjadrením množstva častíc (atómov alebo molekúl) určitého plynu v plynnej zmesi. V tomto prípade je jednotka ppm 10^4 násobkom molového zlomku daného plynu (zložky) v zmesi. Molový zlomok je fyzikálne najexaktnejšia jednotka na vyjadrenie koncentrácie zložky v roztoku. Meracie prístroje merajúce koncentráciu plynov (napr. vo vzduchu alebo splodinách horenia) uvádzajú namerané hodnoty najčastejšie práve v jednotkách ppm (ktorá vyjadruje 10^4 násobok molového zlomku). Výnimkou sú plyny s vysokou koncentráciou (napr. kyslík, dusík a oxid uhličitý), ktorých koncentráciu uvádzajú v obj %. Okrem uvedených jednotiek sa pri vyjadrení koncentrácie plynov môžeme sporadicky stretnúť aj s jednotkami mg.m^{-3} a g.m^{-3} . Uvedené jednotky sa však častejšie používajú pri vyjadrení koncentrácie prachov horľavých tuhých látok (prachu) vo vzduchu.

Koncentračné medze horľavosti (výbušnosti) väčšiny uhľovodíkov a ďalších plynov sa pohybujú v rozmedzí od 1,8 do 16 % obj. Výnimku tvorí šesť plynov: vodík (H_2), acetylén (C_2H_2), etylén (C_2H_4), oxid uhoľnatý (CO), sulfid uhoľnatý (CS) a sírovodík (H_2S), ktoré Nemci kvôli podstatne širším medziam výbušnosti nazývajú „zlé plyny“. Uvedené plyny majú rozsah koncentračných medzí výbušnosti 72 až 80 obj. % (Zelený a Slosiarik 2000).

Dolná koncentračná medza výbušnosti φ_{dmv} (obj. %) horľavého plynu alebo pary horľavej kvapaliny môže byť odhadnutá na základe množstva tepla potrebného na udržanie procesu horenia tejto látky (pre väčšinu plynov a pár je to 1830 kJ.m^{-3}) a výhrevnosti tejto látky Q_{v}^{m} (výhrevnosť na jednotku hmotnosti kJ.kg^{-1}) podľa rovnice [3.1], ktorú uvádzajú napr. Zelený a Slosiarik (2000). Pri zisťovaní príčin vzniku požiarov a explózií však môže byť rovnica [3.1] použitá len pre prvý odhad, pre potreby potvrdenia alebo zamietnutia hypotézy o príčine vzniku požiaru sú potrebné údaje zmerané akreditovanou skúšobňou.

$$\varphi_{\text{dmv}} = \frac{1830}{Q_{\text{v}}^{\text{m}}} \cdot 10^2 \quad (\text{obj. \%}) \quad [3.1]$$

Dolné medze výbušnosti vybraných plynov a pár horľavých kvapalín sú uvedené v tabuľke 3-3.

Tabuľka 3-3 Dolné a horné medze výbušnosti vybraných plynov a pár horľavých kvapalín

Plyn/kvapalina	Dolná medza výbušnosti (obj. %)	Horná medza výbušnosti (obj. %)
Acetón	2,6	13
Acetylén	2,5	100
Amoniak	15	28
Benzén	1,3	7,9
Benzín	1,2	7,1
Bután	1,8	8,4
Butyl acetát	1,4	8
Cyklohexán	1,3	7,8
Cyklopropán	2,4	10,4
Etán	3	12,4

Pokračovanie Tabuľky 3-3

Plyn/kvapalina	Dolná medza výbušnosti (obj. %)	Horná medza výbušnosti (obj. %)
Etanol	3,3	19
Heptán	1,1	6,7
Hexán	1,2	7,4
Izobután	1,8	8,4
Izobutylén	1,8	9,6
Izopropanol	2,2	-
Kianovodík	5,6	40
Metanol	6,7	36
Metán	5	15
Metyl-etyl-ketón	1,9	10
Oxid uhoľnatý	12,5	74
Propán	2,1	9,5
Propylén	2,4	11
Sírovodík	4	44
Styrén	1,1	-
Toluén	1,2	7,1
Vinylchlorid	4	22
Vodík	4	75

Prameň: Babrauskas 2003 a Lower and Upper Explosive Limits (2014)

Údaje o dolnej a hornej koncentračnej medzi výbušnosti sa líšia v závislosti od použitej skúšobnej metodiky, ako aj spôsobu vyhodnotenia. Dolné a horné medze výbušnosti stanovené v 20 l výbuchovej komore (tvaru gule) a v sklenenom venci podľa (dnes už neplatnej) DIN 51649-1:1986 ilustruje tabuľka 3-4.

Tabuľka 3-4 Vplyv skúšobnej metodiky a spôsobu vyhodnotenia na dolnú a hornú medzu výbušnosti plyných alkánov

Plyn/metóda 20 l guľa	Sklenený valec					
	LEL _{7%} (% obj.)	UEL _{7%} (% obj.)	LEL _{2%} (% obj.)	UEL _{2%} (% obj.)	LEL _{DIN} (% obj.)	UEL _{DIN} (% obj.)
Metán	4.85 ± 0.11	15.1 ± 0.3	4.58 ± 0.11	15.9 ± 0.3	4.60 ± 0.06	16.2 ± 0.2
Etán	2.53 ± 0.09	13.8 ± 0.2	2.46 ± 0.09	14.1 ± 0.2	2.39 ± 0.05	14.8 ± 0.2
Propán	1.93 ± 0.07	9.4 ± 0.2	1.85 ± 0.07	10.2 ± 0.2	1.82 ± 0.04	10.5 ± 0.2
Bután	1.55 ± 0.04	8.1 ± 0.2	1.38 ± 0.04	8.6 ± 0.2	1.34 ± 0.03	8.9 ± 0.2

Prameň: Smedt a kol. (1999)

LEL: lower explosion limit (dolná koncentračná medza výbušnosti),
 UEL: upper explosion limit (horná koncentračná medza výbušnosti),
 dolný index 7% znamená, že ako explózia bol vyhodnotený 7% nárast tlaku v skúšobnom zariadení,
 dolný index 2% znamená, že ako explózia bol vyhodnotený 2% nárast tlaku v skúšobnom zariadení,
 dolný index DIN znamená, že príslušná hodnota bola stanovená skúšobným postupom podľa dnes už neplatnej DIN 51649:1986.

Teplota vznietenia horľavého plynu je minimálna teplota horúceho povrchu, ktorá spôsobí vznietenie stechiometrickej zmesi horľavého plynu s oxidačným prostriedkom (najčastejšie vzduchom) za predpísaných podmienok skúšky. **Minimálna iniciačná energia je minimálna energia** potrebná na iniciáciu stechiometrickej zmesi horľavého plynu s oxidačným prostriedkom (najčastejšie vzduchom) za predpísaných podmienok skúšky.

Rozdiel medzi koncentračnými medzami výbušnosti na jednej strane a teplotou vznietenia a minimálnou iniciačnou energiou na strane druhej je ten, že pri iniciácii (požiaru alebo výbuchu) horľavého plynu predstavuje koncentračná medza výbušnosti látkovú podmienku (horľavú látku v trojuholníku horenia) a teplota vznietenia (minimálna iniciačná energia) charakterizuje parametre iniciačného zdroja, ktorý dokáže takúto zmes iniciovať. Opäť je však potrebné upozorniť, že teplota vznietenia a minimálna iniciačná energia horľavého plynu (alebo pary horľavej kvapaliny) sa meria normalizovaným skúšobným postupom, ktorému reálne podmienky nie vždy zodpovedajú (napr. teplota horľavého plynu pred kontaktom s horúcim povrchom, rýchlosť a typ prúdenia horľavého plynu a pod.), preto za reálnych podmienok môže dôjsť k iniciácii horľavého plynu aj pri nižšej teplote alebo iniciačnej energii.

Teplotu vznietenia a minimálnu iniciačnú energiu vybraných plynov ilustruje tabuľka 3-5.

Tabuľka 3-5 Teploty vznietenia a minimálne iniciačné energie vodíka a alkánov v plynnom skupenstve

Plyn	Teplota vznietenia vo vzduchu (°C)	Teplota vznietenia v kyslíku (°C)	Min. iniciačná energia vo vzduchu (mJ)	Min. iniciačná energia v kyslíku (mJ)
Vodík	520	400	0,017	0,0012
Metán	640	556	0,3	0,003
Etán	515	506	0,26	0,002
Propán	500	466	0,26	0,002
Bután	408	283	0,26	0,009
Acetylén	305	296	0,017	0,0002

Prameň: Babrauskas (2003)

Spalné teplo je v EN ISO 1716:2010 definované, ako množstvo tepla, ktoré sa uvoľní dokonalým spálením látky v atmosfére kyslíka, pričom voda je v spalinách vo forme kvapaliny. **Výhrevnosť** je definovaná podobne ako spalné teplo s tým rozdielom, že voda je v spalinách vo forme pary. Spalné teplo a predovšetkým výhrevnosť nachádzajú aplikáciu pri zisťovaní príčin vzniku požiaru predovšetkým pri odhade množstva tepla uvoľneného (a následného tepelného pôsobenia na okolie) pri požiari horľavej látky.

Množstvo vzduchu (kyslíka) potrebné na dokonalé spálenie horľavej látky umožňuje odhadnúť maximálne množstvo horľavej látky, ktoré môže zhorieť v uzatvorenom priestore. Prípadne pri známej výmene vzduchu medzi požiarnym úsekom a exteriérom a známej rýchlosti odhorievania horľavej látky umožňuje odhadnúť koncentráciu kyslíka v požiarnom úseku.

Spalné teplo, výhrevnosť a množstvo vzduchu a kyslíka potrebného na dokonalé zhorenie vodíka a alkánov v plynnom skupenstve ilustruje tabuľka 3-6.

Tabuľka 3-6 Spotreba vzduchu na horenie, spalné teplo a výhrevnosť vodíka a alkánov v plynnom skupenstve

Plyn	r (kg.kg ⁻¹)	r_v (kg.kg ⁻¹)	Spalné teplo			Výhrevnosť		
			(kJ.mol ⁻¹)	(MJ.kg ⁻¹)	(MJ.m ⁻³)	(kJ.mol ⁻¹)	(MJ.kg ⁻¹)	(MJ.m ⁻³)
Vodík	7,93	34,05	285,83	141,78	12,75	245,18	121,62	10,94
Metán	3,98	17,1	890,03	55,48	39,71	809,02	50,43	36,09
Etán	3,72	15,98	1559,84	51,87	69,59	1437,89	47,81	64,15
Propán	3,62	15,56	2219,9	50,34	99,04	2057,3	46,65	91,78
Bután	3,58	15,36	2878,46	49,5	128,4	2675,21	46	119,4

Spalné teploty a výhrevnosti boli vypočítané z údajov uvádzaných Vohlídalom a kol. (1999)

r : množstvo kyslíka potrebné na dokonalé spálenie jednotkového množstva látky (kg.kg⁻¹)

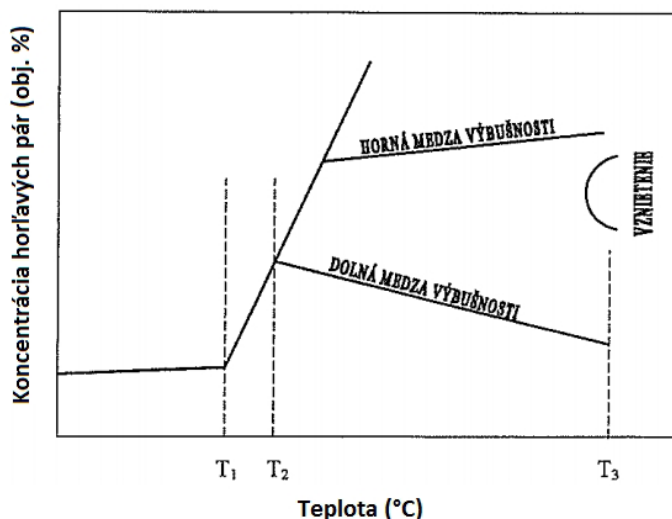
r_v : množstvo vzduchu potrebné na dokonalé spálenie jednotkového množstva látky (kg.kg⁻¹)

3.2.

Horľavé kvapaliny

O parách horľavých kvapalín platia v princípe podobné závery, ako o horľavých plynoch. Jediným rozdielom je že, pri horľavých kvapalinách sa neuvažuje s koncentračnými, ale teplotnými medzami horľavosti. **Dolná teplotná medza horľavosti** môže byť definovaná ako minimálna teplota na ktorú je potrebné ohriať horľavú kvapalinu, aby sa z jej povrchu uvoľnilo také množstvo horľavých pár, ktoré dosiahne za predpísaných podmienok skúšky dolnú medzu horľavosti. Podobne je definovaná aj horná medza horľavosti, ako teplota horľavej kvapaliny pri ktorej sa z jej povrchu uvoľní také množstvo horľavých pár, že tieto dosiahnu hornú koncentračnú medzu horľavosti.

Dolná teplotná medza horľavosti môže byť s určitým zjednodušením stotožnená s bodom vzplanutia horľavej kvapaliny. Hornú teplotnú medzu horľavosti môže horľavá kvapalina dosiahnuť len v uzatvorenej sústave napr. v cisterne. Na voľnom priestranstve alebo v priestore s dostatočne veľkým objemom (v pomere k hmotnosti horľavej kvapaliny) horľavá kvapalina hornú teplotnú medzu horľavosti nedosiahne (vo voľnom priestranstve a dostatočne veľkom priestore môže horľavá kvapalina dosiahnuť hornú medzu horľavosti len lokálne). Závislosť dolnej a hornej koncentračnej medze horľavosti horľavej kvapaliny od teploty ilustruje obr. 3-2.



Obrázok 3-2 Závislosť koncentrácie pár horľavých kvapalín od teploty (Zelený a Slosiarik 2000)

Okrem charakteristík podobných ako u horľavých plynov (medze horľavosti, teplota vznietenia, minimálna iniciačná energia, spalné teplo a výhrevnosť a množstvo vzduchu (kyslíka) potrebné na dokonalé spálenie jednotkového množstva horľavej kvapaliny) sú pre potreby posudzovania požiarného rizika a zisťovanie príčin vzniku požiarov dôležité aj ďalšie vlastnosti horľavých kvapalín. Prvou a najdôležitejšou je bod vzplanutia, ďalej bod horenia, rýchlosť úbytku hmotnosti počas horenia, teplota varu a výparné teplo.

Bod vzplanutia je definovaný, ako najnižšia teplota skúšanej látky, prepočítaná na štandardný atmosférický tlak 101,3 kPa, pri ktorej aplikovanie skúšobného plameňa spôsobí, že sa pary skúšaného množstva vzorky zapália a plameň sa rozšíri po povrchu kvapaliny za určených podmienok skúšky. **Bod horenia** je definovaný, ako najnižšia teplota skúšaného množstva vzorky, prepočítaná na štandardný atmosférický tlak 101,3 kPa, pri ktorej aplikácia skúšobného plameňa spôsobí, že sa pary zapália a ustálene horia počas minimálne 5 s za určených podmienok skúšky (EN ISO 2592:2001). Bod vzplanutia je veľmi dôležitý údaj pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov, nakoľko sa jedná o minimálnu teplotu horľavej kvapaliny na ktorú musí byť táto ohriata, aby jej pary bolo možné zapáliť malým iniciačným zdrojom (napr. plameňom zapaľovača) nepôsobiacim priamo na jej povrch. Pri praktickej aplikácii tejto hodnoty pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov je však potrebné pamätať na tri významné obmedzenia. Prvým je skutočnosť, že bod vzplanutia sa stanovuje rôznymi skúšobnými metodikami, ktoré je ale možné principiálne rozdeliť na skúšobné metodiky v uzatvorenom a skúšobné metodiky v otvorenom tégliku. Bod vzplanutia stanovený v otvorenom tégliku je vždy vyšší, ako bod vzplanutia stanovený v uzatvorenom tégliku. Pri zisťovaní príčin vzniku požiaru v konkrétnom prípade je potrebné vychádzať z bodu vzplanutia stanoveného metodikou, ktorá sa najviac približovala k zisťovanej udalosti. Druhým významným obmedzením je fakt, bod vzplanutia nie je možné aplikovať pre prípady, keď bola kvapalina zapálená pôsobením iniciačného zdroja s vysokou energiou (napr. plameň alebo horúci povrch) priamo na jej povrch. V tomto prípade totiž dôjde k lokálnemu ohriatiu horľavej kvapaliny nad bod vzplanutia a následnému zapáleniu horľavej kvapaliny v mieste pôsobenia iniciačného

zdroja, odkiaľ sa plameň rozšíri po celom povrchu. Tretím významným obmedzením je závislosť bodu vzplanutia od atmosférického tlaku. Horľavá kvapalina v priestore s nižším tlakom ako normálnym atmosférickým tlakom (101 325 Pa) vykazuje nižší bod vzplanutia, ako bod vzplanutia stanovený normalizovaným skúšobným postupom.

Pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov je možné prijať nasledovný záver. Ak je kvapalina zahriata na teplotu nižšiu ako bod vzplanutia (stanovený v uzatvorenom tégliku), tak ju s vysokou mierou pravdepodobnosti nie je možné zapáliť krátkodobým pôsobením iniciačného zdroja s nízkou energiou (napr. plameň zapalovača, zápalky, sviečky, horiacej cigarety a pod.) na jej pary. Pravdepodobnosť iniciácie narastá s tým, ako sa teplota horľavej kvapaliny blíži k bodu vzplanutia a s narastajúcou energiou iniciačného zdroja a časom pôsobenia. Pôsobením iniciačného zdroja s vysokou energiou (napr. otvoreného plameňa) priamo na povrch horľavej kvapaliny je však túto možné zapáliť aj v prípade, ak jej teplota je pod bodom vzplanutia (pri použití iniciačného zdroja s vysokou energiou – napr. acetylénovo – kyslíkový plameň alebo pri dlhodobejšom pôsobení je možné zapáliť aj horľavú kvapalinu s teplotou hlboko pod bodom vzplanutia). Okrem toho je potrebné zdôrazniť, že horľavé kvapaliny môžu byť zapálené aj pri teplotách hlboko pod bodom vzplanutia iniciačným zdrojom s relatívne nízkou energiou (napr. zápalka) ak sú tieto nasiaknuté v poréznom materiály (napr. na textile).

Rýchlosť úbytku hmotnosti horľavej kvapaliny závisí predovšetkým od chemického zloženia horľavej kvapaliny, priemeru nádrže a vlastností stien nádrže (predovšetkým tepelno-technických), hĺbky horľavej kvapaliny pod horným okrajom nádrže a rýchlosti prúdenia vzduchu. Rýchlosť úbytku hmotnosti horľavej kvapaliny umožňuje spolu s údajom o jej výhrevnosti odhadnúť rýchlosť uvoľňovania tepla z požiaru horľavej kvapaliny.

Nakoľko rýchlosť úbytku hmotnosti horľavej kvapaliny významným spôsobom závisí od priemeru nádrže v ktorej horí, v praxi sa obyčajne udáva špecifická rýchlosť úbytku hmotnosti horľavej kvapaliny v nádrži s nekonečným priemerom. Z tejto hodnoty sa počíta špecifická rýchlosť úbytku hmotnosti horľavej kvapaliny v nádrži s priemerom nad 20 cm podľa rovnice [3.2], ktorú odvodili Zabetakis a Burgess (1961). Jedinú výnimku predstavujú alkoholy, ktorých rýchlosť úbytku hmotnosti podľa Babrauskasa (2009) nezávisí od priemeru nádoby (tento záver platí od priemeru nádoby 20 cm).

$$\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}'' \cdot (1 - e^{-k\beta \cdot D}) \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad [3.2]$$

\dot{m}'' : špecifická rýchlosť úbytku hmotnosti kvapaliny v nádrži s priemerom D (m)

\dot{m}_{∞}'' : špecifická rýchlosť úbytku hmotnosti kvapaliny v nádrži s nekonečným priemerom ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

k, β : koeficienty vyjadrujúce vplyv vlastností kvapaliny na rýchlosť úbytku hmotnosti (m^{-1})

D : priemer nádrže (m)

Koeficienty k a β sa v tabuľkách neuvádzajú samostatne, ale vždy sa uvádza ich súčin ($k \cdot \beta$). Špecifické rýchlosti úbytku hmotnosti horľavých kvapalín v nádrži s nekonečným priemerom je rovnako možné nájsť v tabuľkách. Hustotou, špecifickou rýchlosťou úbytku hmotnosti, výhrevnosť a súčin koeficientov $k \cdot \beta$ pre vybrané horľavé kvapaliny uvádza tabuľka 3-7.

Tabuľka 3-7 Hustota, špecifická rýchlosť úbytku hmotnosti (m_{00}''), výhrevnosť a súčin koeficientov k, β vybraných horľavých kvapalín

Horľavá kvapalina	Hustota (kg.m ⁻³)	m_{00}'' (kg.m ⁻² .s ⁻¹)	Výhrevnosť (MJ.kg ⁻¹)	k, β (m ⁻¹)
Metanol	796	0,017	20	–
Etanol	794	0,015	26,8	–
Bután	573	0,078	45,7	2,7
Benzén	874	0,085	40,1	2,7
Hexán	650	0,074	44,7	1,9
Heptán	675	0,101	44,6	1,1
Xylén	870	0,09	40,8	1,4
Acetón	791	0,041	25,8	1,9
Dioxán	1035	0,018	26,2	5,4
Dietyl éter	714	0,085	34,2	0,7
Benzín	740	0,055	43,7	2,1
Petrolej	820	0,039	43,2	3,5
Transformátorový olej	760	0,039	46,4	0,7
Ťažký vykurovací olej	940–1000	0,035	39,7	1,7
Ropa	830–880	0,022–0,045	42,5–42,7	2,8
PMMA	1184	0,02	24,9	3,3
PP	905	0,018	43,2	–
PS	1050	0,034	39,7	–

Prameň: Babrauskas (2002)

Významnými charakteristikami horľavých kvapalín determinujúcimi ich správanie sa počas požiaru sú **teplota varu** a **výparné teplo**. Čím sú tieto hodnoty nižšie, tým sa horľavá kvapalina vyparuje rýchlejšie (má vyššiu rýchlosť úbytku hmotnosti) a rýchlejšie uvoľňuje pri požiari teplo. Bod vzplanutia, teplota vznietenia, teplota varu a výparné teplo vybraných horľavých kvapalín ilustruje tabuľka 3-8.

Tabuľka 3-8 Bod vzplanutia, teplota vznietenia, teplota varu a výparné teplo vybraných horľavých kvapalín

Kvapalina	Bod vzplanutia (°C)	Teplota vznietenia (°C)	Teplota varu (°C)	Výparné teplo (J.g ⁻¹)
Acetón	–18	465	56,29	500,80
Akroleín	–26	278	52,69	505,00
Anilín	70	530	184,40	478,20
Benzén	–11	580	80,10	393,79
Bután-1-ol	29	365	117,66	581,96
Bután-2-ol	24	414	99,55	550,30
Cyklohexán	–18	259	80,73	355,95
Etanol	13	365	78,29	841,54
Heptán	–4	223	98,43	316,30
Heptán-1-ol	73	282	176,30	501,23
Hexán	–23	223	68,74	334,80
Metanol	11	470	64,70	1101,20
Propán-1-ol	15	439	97,20	695,40
Styrén	31	490	145,14	387,04

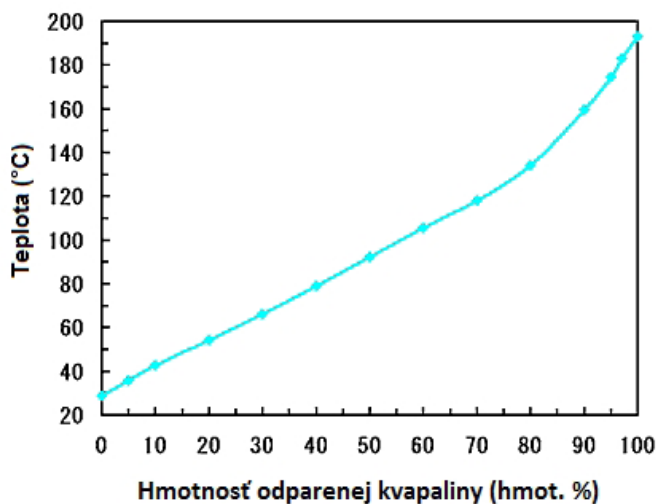
Prameň: Babrauskas (2003) – teploty vzplanutia a vznietenia, Vohlídala kol. (1999) – teploty varu a výparné teploty

Najpoužívanejším akcelerátorom požiaru je automobilový benzín. Dôvodom je predovšetkým jednoduchá dostupnosť, nízky bod vzplanutia a vysoká výhrevnosť (rýchlosť uvoľňovania tepla).

Automobilový benzín je zmes kvapalných uhľovodíkov získaných spracovaním ropy (predovšetkým destiláciou a krakovaním) s biozložiek (horľavé kvapaliny vyrobené z obnoviteľných zdrojov energie – dnes sa najčastejšie používa Etyl *tert*-butyl éter – skratka ETBE) a rôznych aditív na zlepšenie ich vlastností. Na rozdiel od biozložiek (ktoré sa dnes pridávajú vo významnom množstve) a aditív chemické zloženie zmesi uhľovodíkov získaných spracovaním ropy presne nepoznáme, resp. postupmi analytickej chémie je ho možné stanoviť relatívne presne, ale toto závisí od zloženia ropy (závisí od zdroja, ale aj z rovnakého zdroja sa ropa časom mení) a technológie jej spracovania. Vlastnosti zmesi získaných spracovaním ropy, ktoré tvoria podstatnú časť automobilového benzínu sa preto často vyjadrujú prostredníctvom tzv. destilačnej krivky. Destilačná krivka udáva, koľko % hmotnosti sa odparí (predestiluje) zo zmesi uhľovodíkov do určitej teploty. Príklad destilačnej krivky benzínu je na obr. 3-3. Údaj 50 hmot. % pri teplote 100 °C na destilačnej krivke znamená, že 50 hmot. % zmesi má teplotu varu rovnú alebo nižšiu ako 100 °C.

Vybrané fyzikálne a chemické vlastnosti automobilového benzínu (bez biozložky a aditív) sú uvedené v tabuľke 3-9 (charakteristiky poskytla spoločnosť Slovnaft, a.s.).

Závislosť tlaku pár benzínu a nafty od teploty a množstva odpareného podielu ilustruje obr. 3-4



Obrázok 3-3 Príklad destilačnej krivky benzínu (Central Custom Laboratory 2002)

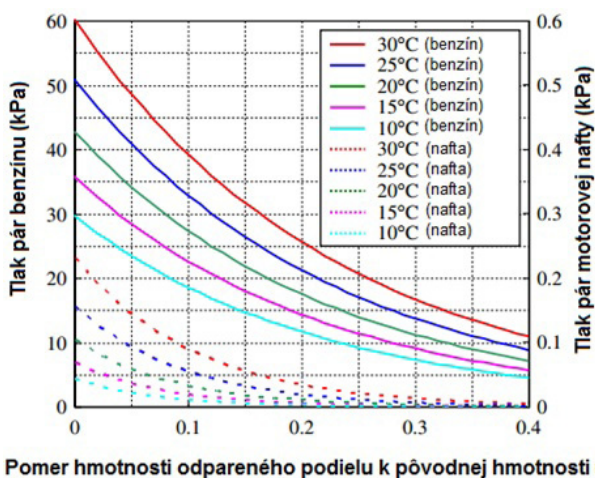
Tabuľka 3-9 Fyzikálne a chemické vlastnosti benzínu bez biozložky a aditív

Fyzikálne a chemické vlastnosti		
Hustota pri 15 °C	kg.m ⁻³	748,2
Začiatok destilácie	°C	33,9
Destilačný zvyšok pri 70 °C	hmot. %	72,6
Destilačný zvyšok pri 100 °C	hmot. %	52,4
Destilačný zvyšok pri 150 °C	hmot. %	21,9
Destilačný zvyšok pri 180 °C	hmot. %	4,9

Pokračovanie Tabuľka 3-9

Fyzikálne a chemické vlastnosti		
Koniec destilácie	°C	201,7
Obsah nasýtených uhľovodíkov	obj. %	52,1
Obsah aromatických uhľovodíkov	obj. %	34,6
Obsah benzénu	obj. %	0,86
Obsah síry	mg.kg ⁻¹	5,77
Obsah kyslíka	mg.kg ⁻¹	0,1
Obsah vody	mg.kg ⁻¹	70
Výskumné oktánové číslo	-	95,6

Prameň: Slovnaft, a.s. (2012)



Obrázok 3-4 Závislosť tlaku pár benzínu a motorovej nafty od odpareného podielu a teploty (Okamoto a kol. 2012)

Vo všeobecnosti obsahuje zmes kvapalných uhľovodíkov vzniknutých spracovaním ropy (z ktorých sa vyrába automobilový benzín) od 50 do 60 obj. % nasýtených uhľovodíkov a od 30 do 40 obj. % nenasýtených uhľovodíkov. Časť nenasýtených uhľovodíkov pozostáva z približne 35 obj. % aromatických uhľovodíkov a z 5 obj. % alkénov.

3.3.

Horľavé tuhé látky

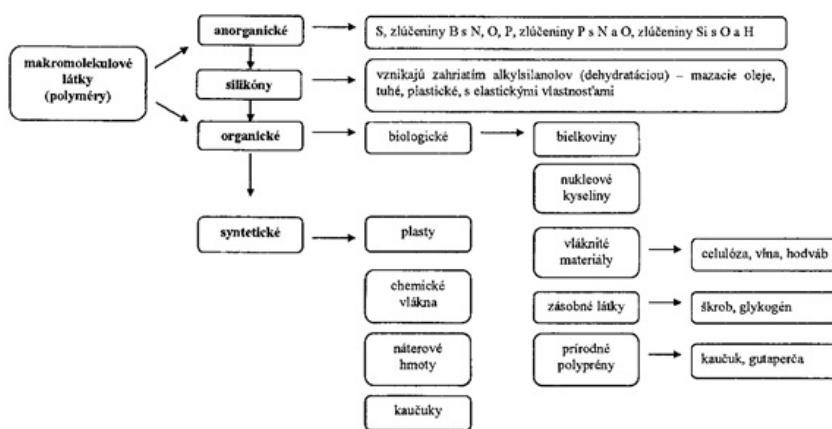
Tuhé horľavé látky predstavujú pri väčšine vnútorných požiarov rozhodujúcu časť paliva. Tuhé horľavé látky sa delia na organické a anorganické. Organické tuhé horľavé látky sa ďalej delia na nízkomolekulové (napr. naftalén) a makromolekulové (napr. polyetylén). Takmer pri všetkých vnútorných požiaroch je rozhodujúca časť požiarneho zataženia tvorená makromolekulovými látkami. Preto bude týmto látkam venovaná v tejto podkapitole bližšia pozornosť.

3.3.1.

Organické polyméry

Polymér je látka s veľkou relatívnou molekulovou hmotnosťou, vznikajúca veľakrát opakujúcim sa spájaním malých molekúl (monomérmé jednotky), v takom počte, že pridaním alebo odobraním jednej alebo niekoľkých takýchto jednotiek sa nezmenia vlastnosti tejto látky (Kačíková a kol. 2007).

V organickej chémii sa polymérne materiály rozdeľujú na prírodné (biopolyméry) a syntetické. Typickým príkladom prírodných polymérov je napr. drevo a bavlna. Medzi syntetické polyméry patria napr.: polyetylén (PE), polypropylén (PP), polystyrén (PS) a polytetrafluóretylén (PTFE). Komplexné rozdelenie makromolekulových látok uvádzajú Kačík a Laurová (2008), tak ako znázorňuje obr. 3-5.



Obrázok 3-5 Rozdelenie makromolekulových látok (Kačík a Laurová 2008)

Ako **syntetické** označujeme polyméry, ktoré boli pripravené (syntetizované) umelo z nízkomolekulových zlúčenín. V kontexte obr. 3-5 sa delia na plasty, chemické vlákna, náterové hmoty a kaučuky. Rozhodujúca časť požiarného zataženia väčšiny vnútorných požiarov je tvorená plastmi a drevom.

Plast je látka polymérnej povahy, ktorú možno tvarovať a tvárniť, pričom aspoň raz prechádza plastickým stavom (STN 64 0001:1995).

Plasty sa obvyčajne zaraďujú medzi syntetické polymérne materiály. Existujú však plasty, ktorých podstatu tvoria prírodné makromolekulové látky, napr. celulóza, typickými predstaviteľmi sú celuloid a celofán.

Syntetické polyméry patria medzi najmladšie materiály. Raab (1999) uvádza ako prvé plasty celuloid a galalit (umelá rohovina), ktorý sa vyrábal z mliečnej bielkoviny kazeínu. Celuloid bol pripravený v druhej polovici devätnásteho storočia z nitrocelulózy a gáfru. Celuloid však nebol plne syntetickým materiálom, nakoľko bol založený na prírodnej makromolekulárnej látke celulóze. Prvým skutočne syntetickým polymérnym materiálom sa stal až bakelit, ktorí pripravil v roku 1907 Leo Hendrik Baekeland (Raab 1999).

Z hľadiska správania sa pri pôsobení vonkajších síl sa polyméry delia na plastoméry, t.j. látky, ktoré zostávajú deformované, aj keď deformujúce napätie prestane pôsobiť

a elastoméry, t.j. látky, ktoré sa rýchlo vracajú do pôvodného tvaru a rozmerov, z ktorých boli deformované malým napätím (Skočovský 1998).

STN 64 0001:1995 rozdeľuje plasty na termoplasty a reaktoplasty.

Termínom termoplasty sa označujú tuhé syntetické polyméry, ktoré charakterizuje schopnosť meniť sa ohrevom na plastickú tvarovateľnú konzistenciu a po nasledujúcom ochladení opäť nadobudnúť pôvodnú tuhosť a pevnosť (Svoboda a kol. 2005). Termoplasty nadobúdajú po ochladení vlastnosti pôvodného materiálu.

Charakteristickou vlastnosťou reaktoplastov je schopnosť vytvárať chemickú reakciou pomerne ľahko makromolekulárnu štruktúru, ktorá má typickú podobu trojrozmernej siete. Sieť zostáva zachovaná aj pri ohreve a spravidla dochádza ešte k jej ďalšiemu rozvoju (tepelné dotvrdenie). Reaktoplasty nemajú vratné termoplastické správanie. Keďže nie sú za tepla tvarovateľné, hovorilo sa im aj termosety. Tento názov bol neskôr označený ako nepresný, pretože nemožno tvrdiť, že by sa reaktoplasty teplom nemenili. Výstižnejšie označenie duroplasty sa prevzalo z nemčiny, ale zatiaľ sa u nás nerozšírilo (Svoboda a kol. 2005).

Medzi najvýznamnejšie termoplasty patrí napr.: PE, PP, PS, polyvinylchlorid (PVC), polyetyléntereftalát (PET), polyamid (PA) a polymetylmakrylát (PMMA). K najznámejším reaktoplastom patria: fenoplasty, aminoplasty, epoxidové živice a silikóny. Existujú však plasty, ktoré nie je možné jednoznačne zaradiť do jednej z vyššie uvedených skupín, napr.: kaučuky a polyuretány. Správanie konkrétneho polyuretánu závisí od chemického zloženia monomérov a spôsobu výroby.

Mleziva a Šňupárek (2000) delia polyméry podľa chemickej príbuznosti na polyolefíny (polyalkény), polydiény (kaučuky), polystyrénové plasty, polyhalogénolefíny, polyvinylestery a odvodené plasty, polyvinylétery, polyméry a kopolyméry kyseliny akrylovej a metakrylovej a ich deriváty, polyétery, polyacetáty, polyester, polyamidy, polyimidy a polyimidazoly, polysulfidy a polysulfony, fenoplasty, aminoplasty, furánové živice, silikóny, epoxidové živice, polyuretány, celulózu a jej deriváty. Zvláštnu skupinu tvoria meniče iónov.

Z hľadiska posudzovania požiarneho rizika, dynamiky rozvoja požiaru a zisťovanie príčin vzniku požiarov je kľúčový rozdiel medzi správaním sa termoplastov a reaktoplastov počas ich termického zataženia (požiaru). Termoplasty sa počas požiaru tavia, roztekajú (čím uľahčujú jeho šírenie) a horia ako horľavé kvapaliny, zatiaľ čo reaktoplasty vytvárajú na svojom povrchu tuhú zuhoľnatú vrstvu. Oba tieto javy môžu zanechať cenné stopy pre potreby zisťovania príčin vzniku požiaru.

3.3.1.1.

Výroba syntetických polymérov

Pre pochopenie mechanizmu termickej degradácie syntetických polymérov je potrebné popísať mechanizmus ich výroby, nakoľko s istou mierou zjednodušenia je možné tvrdiť, že degradácia polyméru je reverzným procesom k procesu jeho výroby. Syntetické polyméry sa pripravujú z jednoduchých chemických zlúčenín jednou z nasledujúcich chemických reakcií (polyreakcií):

- polymerizácia,
- polykondenzácia,
- polyadícia.

Podľa Masaříka (2003) možno chemickú reakciu sprevádzanú vznikom makromolekuly všeobecne znázorniť rovnicou [3.3].



n: počet molekúl jednoduchej zlúčeniny

X: chemický vzorec jednoduchej zlúčeniny

X_n : makromolekula obsahujúca n spolu viazaných molekúl jednoduchej zlúčeniny

V našom prípade je X jednoduchá organická zlúčenina, nazývaná monomér, ktorá je za určitých okolností schopná reagovať sama so sebou a vytvoriť tak molekulu polyméru. Reakcia sprevádzaná vznikom polyméru podľa rovnice [3.3] sa nazýva polymerizácia (Masařík 2003).

Polymerizácia je z kinetického hľadiska reťazová reakcia, ktorá môže byť realizovaná radikálovým alebo iónovým mechanizmom. Polymerizáciu, pri ktorej vzniká polymér len z jedného druhu stavebnej jednotky nazývame homopolymerizácia. Ak pri polymerizácii vzniká polymér, ktorého štruktúrna jednotka pozostáva z dvoch, alebo viacerých stavebných jednotiek, ide o kopolymerizáciu (Masařík 2003).

Stupňovité výstavbové reakcie charakterizuje fakt, že k rastu reťazca dochádza reakciou medzi párami vzájomne reaktívnych funkčných skupín monomérov alebo vyšších polymérnych produktov syntézy. Stupňovité polyreakcie sa rozdeľujú na polykondenzačné a polyadičné (Kačík a Laurová 2008).

Polykondenzácia je reakcia, pri ktorej vzniká z dvoch nízkomolekulových látok polymér a nízkomolekulová látka, najčastejšie voda (Ducháček 2006).

Pri polyadiácii nedochádza k odštiepeniu nízkomolekulového produktu, pretože počas reakcie funkčná skupina jednej zložky sa aduje na dvojitú väzbu alebo kruh druhej zložky (Kačík a Laurová 2008).

3.3.1.2.

Vlastnosti syntetických polymérov

Syntetické polyméry predstavujú veľmi širokú skupinu materiálov. Na vyčerpávajúci popis vlastností všetkých syntetických polymérov by nestačil ani rozsah encyklopédie. Napriek tomu existujú všeobecné zákonitosti medzi chemických zložením, štruktúrou a fyzikálnymi vlastnosťami, na základe ktorých je možné s vysokou presnosťou odhadnúť vlastnosti ľubovoľného polyméru. Štruktúra a fyzikálne vlastnosti môžu byť do značnej miery ovplyvnené technológiou výroby a katalyzátormi použitými pri výrobe. Vlastnosti polymérov môžu byť v širokom rozsahu menené prísadami modifikujúcimi ich vlastnosti.

Vlastnosti každého materiálu závisia predovšetkým od jeho chemického zloženia. Chemické zloženie polymérneho materiálu je dané chemickým zložením jeho štruktúrnej jednotky. Chemické zloženie polyméru je teda reprezentované kvalitou a kvantitou atómov tvoriacich jeho konštitučnú jednotku, ako aj druhom a počtom väzieb, ktorými sú tieto navzájom viazané. Významný vplyv na vlastnosti polymérneho materiálu má pevnosť väzieb medzi atómami tvoriacimi základný reťazec (základný reťazec sa často nazýva aj chrbtica polyméru). Ďalšou významnou charakteristikou je druh atómov, resp. funkčných skupín, viazaných na polymérny reťazec.

Technické polyméry môžu pozostávať z nasledovných prvkov: vodík, uhlík, dusík, kyslík, fluór, kremík, síra a chlór. Atómy v rámci jednej makromolekuly sú navzájom viazané kovalentnými väzbami. Druh väzieb rozhodujúcim spôsobom ovplyvňuje nielen mechanickú pevnosť, ale aj stabilitu polyméru za zvýšených teplôt a pri pôsobení korozívneho prostredia. Medzi makromolekulami pôsobia o jeden rád slabšie van der Waalsove sily (Ptáček a kol. 1999).

Vplyv štruktúry syntetických materiálov na ich vlastnosti je významnejší ako pri takmer všetkých ostatných materiáloch. Štruktúra polymérov sa rozdeľuje na submolekulovú, molekulovú a nadmolekulovú.

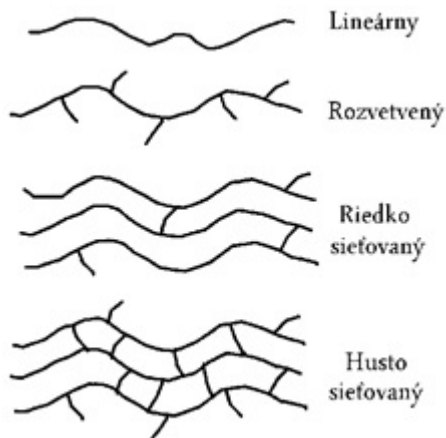
Submolekulovú štruktúru definuje STN 64 0001:1995 ako vnútorné usporiadanie konštitučných jednotiek polymérneho reťazca a ich chemické zloženie (dĺžka a tvar bočných reťazcov, umiestnenie a tvar substituentov, prítomnosť dvojitych a trojitých väzieb atď.).

Chemické zloženie polyméru a submolekulová štruktúra sa čiastočne prelínajú.

STN 64 0001:1995 definuje molekulovú štruktúru ako usporiadanie makromolekúl z hľadiska molekulovej hmotnosti, jej distribúcie, vetvenia a topológie trojrozmerných sietí a vzájomného usporiadania konštitučných jednotiek.

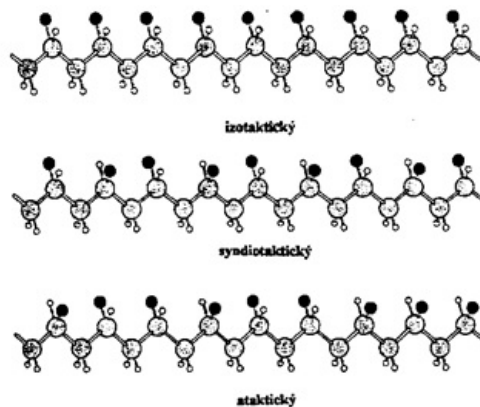
Jednou z najdôležitejších charakteristík makromolekúl je ich veľkosť, resp. dĺžka. Táto sa však obyčajne nevyjadruje priamo, ale prostredníctvom veličiny ktorá je jej úmerná. Pre tento účel sa najčastejšie využíva relatívna molekulová hmotnosť alebo polymerizačný stupeň. Počas syntézy vznikajú makromolekuly pozostávajúce z rôzneho počtu stavebných jednotiek. Preto sa relatívne zastúpenie makromolekúl rôznych hmotností vyjadruje prostredníctvom distribučnej krivky relatívnych molekulových hmotností. Nakoľko je získanie údajov potrebných na zostrojenie distribučnej krivky pomerne náročné v praxi sa často stanovuje len priemerná molekulová hmotnosť a priemerný polymerizačný stupeň. Rozoznávame číselnú priemernú molekulovú hmotnosť a hmotnostnú priemernú molekulovú hmotnosť. Podobne poznáme číselný a hmotnostný priemer polymerizačného stupňa.

Polymerne reťazce v závislosti od počtu reakčných skupín alebo reakčných koncov môžu byť lineárne, rozvetvené a sieťované (obr. 3-6). Lineárne a rozvetvené reťazce sú typické pre termoplasty, ľahko sieťované pre elastoméry a silno sieťované pre reaktoplasty. Husto sieťovaný polymér vytvára jednu veľkú makromolekulu.



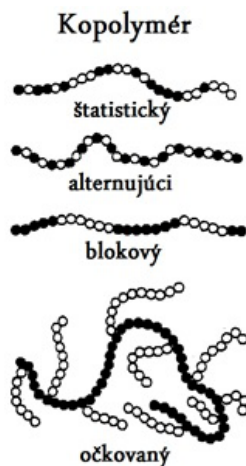
Obrázok 3-6 Rôzne tvary makromolekúl (Lyon 2004)

Podľa geometrického usporiadania molekulového reťazca, keď je kritérium poloha substitučných skupín – R na tzv. asymetrickom uhlíku, rozlišujeme polyméry ataktické s náhodnými polohami postranných substitučných skupín, syndiotaktické s pravidelným striedaním substituentov a izotaktické so substitučnými skupinami umiestnenými na jednej strane vzhľadom k asymetrickému uhlíku (Ptáček a kol. 1999). Takticitu polypropylénu znázorňuje obr. 3-7.



Obrázok 3-7 Izotaktický, syndiotaktický a ataktický polypropylén (Veselý 1992, Ptáček a kol. 1999)

Molekuly kopolymérov sa môžu odlišovať usporiadaním komonomérnych jednotiek. Kopolyméry sa rozdeľujú na štatistické, alternujúce, blokové a vrúbkované (očkované), tak ako to znázorňuje obr. 3-8 (Ptáček a kol. 1999).

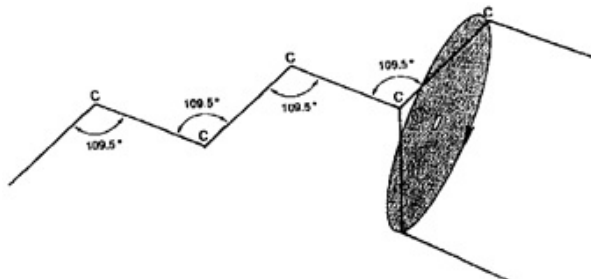


Obrázok 3-8 Štatistický, alternujúci, blokový a očkovaný kopolymér (Ptáček a kol. 1999)

Nadmolekulovou štruktúrou rozumieme usporiadanie polyméru z hľadiska útvarov vzniknutých agregáciou väčšieho počtu makromolekúl (STN 64 0001:1995).

Predpokladom vzájomného usporiadania makromolekulových reťazcov do vyšších útvarov je ich schopnosť nadobúdať rôzne tvary. Polymérne reťazce majú rôznu tuhosť

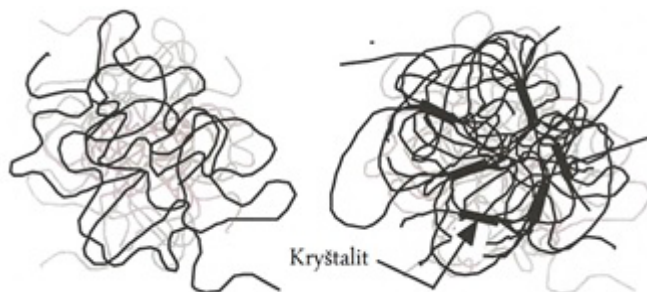
a ich geometria sa môže meniť v závislosti od štruktúry opakujúcich sa konštitučných jednotiek a pravidelnosti ich usporiadania v makromolekule. Pozície, ktoré jednotlivé časti molekúl (segmenty) zaujímajú, sa nazývajú konformácie. Makromolekuly majú snahu zaujať polohu, ktorá zodpovedá minimálnej voľnej energii systému. Najpravdepodobnejšia je preto konformácia náhodného kľbka. Pôsobením vonkajších síl a tepelnej energie sa polohy skupín atómov menia. Rôzne konformácie nadobúdajú reťazce rotáciou okolo jednoduchých väzieb, tak ako to znázorňuje obr. 3-9 (Ptáček a kol. 1999).



Obrázok 3-9 Rotácia molekulového segmentu okolo jednoduchej väzby uhlík – uhlík (Ptáček a kol. 1999)

Syntetické polyméry sa teoreticky môžu nachádzať v dvoch krajných stavoch a to amorfnom alebo kryštalickom. Amorfné polyméry majú konformáciu štatistického kľbka. Podľa Ptáčeka a kol. (1999) žiadny polymér nekryštalizuje v kubickej sústave.

Stav konkrétneho polyméru závisí predovšetkým od jeho chemického zloženia a spôsobu prípravy. Pri týchto materiáloch sa však pomerne často vyskytuje prechodný stav, kedy polyméry schopné kryštalizácie nie sú schopné kryštalizovať v celom objeme. V tomto prípade hovoríme o polokryštalickej látke, ktorá pozostáva z amorfnej oblasti a kryštalickej oblasti reprezentovanej tzv. kryštalitmi. Morfológiu amorfného a polokryštalického polyméru znázorňuje obr. 3-10.



Obrázok 3-10 Morfológia amorfného a polokryštalického polyméru (Lyon 2004)

Napriek skutočnosti, že neexistuje polymér, ktorý by vykazoval kryštalickú štruktúru v celom svojom objeme, poznáme polyméry schopné kryštalizovať do takej miery, že ich označujeme ako kryštalické. Typickým príkladom je PTFE.

Podľa STN 64 0001:1995 môžu počas rastu vzniknúť kryštály fibrilárne (rast kryštálu v jednom smere), lamelárne (rast v dvoch smeroch) a kryštály sférolitické (rast vo všetkých troch smeroch).

Významný vplyv majú na vlastnosti syntetických polymérov aj prísady (aditíva). Medzi prísady zaraďujeme: zmäkčovadlá, mazivá, vyfarbujúce činidlá, plnivá, výstuže, stabilizátory a retardéry horenia. Z uvedených prísad majú na proces a splodiny horenia najvýraznejší vplyv retardéry horenia.

Retardéry horenia zvyšujú odolnosť polymérov proti zapáleniu a po zapálení spomaľujú proces horenia (Masařík 2003). V minulosti bolo hlavnou funkciou retardéra predĺžiť časový interval medzi okamihom začiatku pôsobenia tepelného zdroja na chránený materiál do jeho zapálenia. Tieto typy retardérov sa však často vyznačovali množstvom negatívnych efektov, napr. zvyšovali celkové množstvo uvoľneného tepla v procese horenia alebo rýchlosť jeho uvoľňovania. Ďalším problémom bol nárast množstva alebo toxicity splodín horenia. Pri retardéroch používaných v súčasnosti sú už uvedené nepriaznivé vlastnosti čiastočne alebo úplne potlačené. Okrem retardérov horenia, poznáme aj retardéry vývinu dymu, ktorých hlavným účelom je znížiť celkovú produkciu dym a čo najviac oddialiť jeho produkciu od momentu iniciácie k terminácii.

Podľa spôsobu použitia sa retardéry horenia delia na (Masařík 2003):

- aditívne: látky, ktoré sa pridávajú spolu s inými prísadami do polymérov za účelom úpravy ich vlastností,
- reaktívne: látky, ktoré sú súčasťou reakčnej zmesi pri syntéze polyméru (polymerizácii), vstupujú do makromolekulového reťazca polyméru a zostávajú v ňom trvale chemicky viazané,
- povrchové: zmes látok alebo kombinácia materiálov upravených do formy schopnej vytvoriť ochrannú vrstvu na povrchu výrobku z plastu,
- intumescentné systémy.

Problematika retardérov horenia je podrobnejšie popísaná vo vedeckých prácach Mitterovej (2008) a Osvaldovej a Osvalda (2013).

3.3.1.3.

Termická degradácia syntetických polymérov

Pri tepelnom zaťažení polymérov teplotami typickými pre požiar, dochádza k zmene ich mechanických vlastností a termickému rozkladu.

Podľa Turekovej a Baloga (2001) dochádza pri tepelnom zaťažení polymérov k nasledovným dejom:

- premene kryštalickej modifikácie polyméru,
- roztaveniu polyméru a sublimácii prchavého podielu,
- tepelnému rozkladu spojenému s roztrhnutím väzieb, ale i depolymerizácií, dehydratácií a dehalogenácií,
- vyparovaniu degradačných produktov,
- reakciám atómu kyslíka na tuhom a kvapalnom povrchu polyméru, reakciám atómu kyslíka s plynými degradačnými produktmi,
- pohybu polymérnych molekúl v kvapalnej fáze, pohybu molekúl degradácie v plynnej fáze a iným.

Troitsch (1982) a Balog (1999) uvádzajú štyri základné typy termického rozkladu polymérov:

- Štatistické štiepenie polymérneho reťazca, ktoré je typické pre polyolefíny, produktom sú alkány, alkény a v malom množstve aj monomér.

- Polymér sa odbúrava postupne od miesta vzniku aktívneho centra, pričom rozkladné produkty obsahujú 90 – 100 % monoméru. Typickými predstaviteľmi sú polymetylmetakrylát, polytetrafluóretylén, polyformaldehyd, poly- α -metylstyren a polymetylakrylonitril.
- Rozklad prebieha odštiepením nízkomolekulových produktov (HCl, H₂O) od hlavného reťazca makromolekuly a vzniká uhlíkový zvyšok (polyvinylchlorid, polyvinylidénchlorid, polyvinylacetát).
- Sietovanie, kedy sa vytvárajú prevažne priečne väzby medzi jednotlivými reťazcami. Vzniká malé množstvo prchavých produktov a veľké množstvo uhlíkového zvyšku (polyakrylonitril, polyoxy-*m*-xylén).

3.3.1.4.

Odhad termickej stability syntetických polymérov

Na základe informácií o chemickom zložení, štruktúre a druhu prísad môžeme s pomerne vysokou presnosťou odhadnúť ľubovoľné vlastnosti prakticky každého polyméru. Pri odhade však treba brať na zreteľ veľmi dôležité pravidlo: pri odhade vlastností syntetických polymérov na základe ich chemického zloženia, štruktúry, druhu a množstva prísad, ako aj fyzikálnych vlastností (najmä objemovej hmotnosti) sa musia všetky uvedené vlastnosti posudzovať ako jeden celok.

Prvá predstava o termickej odolnosti polyméru môže byť získaná už na základe jeho elementárneho zloženia. Podľa Masařika (2003) prítomnosť dusíka, kremíka, fluóru a chlóru v konštitučnej jednotke zvyšuje jeho odolnosť voči termickej degradácii. Tepelnú odolnosť zvyšuje aj prítomnosť aromatických benzénových jadier. Dôležitým parametrom je druh väzieb, ktorými sú jednotlivé prvky v konštitučnej jednotke, prípadne makromolekule, viazané. Disociačná energia väzieb medzi vybranými prvkami je uvedená v tabuľke 3-10. Pri hodnotení vplyvu disociačnej energie väzieb na termickú stabilitu, však treba byť mimoriadne opatrný, nakoľko napr. dvojité väzby medzi dvomi uhlíkmi v základnom reťazci za prítomnosti oxidačného prostriedku predstavuje podstatne slabší článok ako väzba jednoduchá, aj napriek vyššej disociačnej energii.

Tabuľka 3-10 Disociačná energia väzieb vybraných prvkov A-B (kJ.mol⁻¹)

B/A	H	C	N	O	F	Cl	Br	I	S	Si
H	436	413	391	463	563	432	366	299	339	–
C	413	348	292	352	441	329	276	240	259	290
N	391	292	160	222	270	200	–	–	–	–
O	463	352	222	139	185	203	–	–	–	369
F	563	441	270	185	153	254	–	–	–	541
Cl	432	329	200	203	254	243	219	–	250	359
Br	366	276	–	–	–	219	193	178	–	289
I	299	240	–	–	–	–	178	151	–	–
S	339	259	–	–	–	250	–	–	213	–
Si	–	290	–	369	541	359	289	–	–	–
C = C	615		C = N	615		C = O	716		N = N	418
C \equiv C	812		C \equiv N	891		N = O	607		N \equiv N	946

Prameň: Lazár a kol. (1986) a Ptáček a kol. (1999)

Ďalším významným faktorom je takticita polyméru, ktorá má vplyv na podiel kryštalickej fázy. Termická a chemická odolnosť polyméru narastajú v smere od ataktického cez syndiotaktický až k izotaktickému, ako aj so zvyšujúcim sa podielom kryštalickej fázy. Pozitívny vplyv na termickú odolnosť má aj zvyšujúca sa hodnota objemovej hmotnosti.

Termickú stabilitu polymérov všeobecne znižuje prítomnosť rôznych typov štruktúrnych odchýlok, ktoré môžu vzniknúť v priebehu spracovania a oxidačného starnutia. Najčastejšie štruktúrne odchýlky sú dvojité a trojitú väzby, miesta vetvenia, štruktúra hlava k hlave, prítomnosť cudzích atómov alebo iónov (Balog 1999).

Exaktné porovnanie termickej odolnosti syntetických polymérov je možné na základe teploty dekompozície (termická odolnosť polyméru narastá s narastajúcou teplotou dekompozície). Teplota dekompozície môže byť, pre potreby posudzovania odolnosti syntetických polymérov voči iniciácii, s určitou mierou zjednodušenia stotožnená s kritickou teplotou termického rozkladu definovanou v podkapitole 2.2. Teplotu dekompozície vybraných syntetických polymérov ilustruje tabuľka 3-11.

Tabuľka 3-11 Teploty dekompozície vybraných organických polymérov

Materiál	Teplota dekompozície (°C)
Polyetylén	335 až 450
Polypropylén	328 až 410
Polytetrafluóretylén	508 až 538
Polyvinylacetát	213 až 325
Polyvinylalkohol	250
Polyvinylchlorid	200 až 300
Polyvinylfluorid	372 až 480
Polyvinylidénchlorid	225 až 275
Polyvinylidénfluorid	400 až 475
Polystyrén	300 až 400
Polymetylmetakrylát	170 až 300
Polyakrylonitril	250 až 280
Triacetát celulózy	250 až 310
Polyetylénoxid	324 až 363
Polyamid 6	320 až 400
Polyamid 66	320 až 400

Prameň: Troitzsch (1982) a Balog (1999)

Aj keď sa zneužitím horľavej látky ako akcelerátora požiaru sú spájané predovšetkým horľavé kvapaliny a v menšej miere horľavé plyny, na páchanie trestného činu úmyselného spôsobenia požiaru sa zneužívajú aj tuhé horľavé látky (predovšetkým syntetické polyméry). Typickým príkladom je polystyrén, ktorý vo všeobecnosti vykazuje vysokú rýchlosť tvory dymu (uvolňovania sadzí). Takáto látka po zapálení v interiéri na ploche z ktorej sa nemôže rozšíriť síce nespôsobí zasiahnutie požiarom celého priestoru, ale celý priestor (vrátane zariadení, predmetov, elektroniky, tovaru a pod.) je znehodnotený sadzami. Takýto postup uplatňujú páchatelia obyčajne kvôli tomu, aby obeť nedostala poisťné plnenie. Pri posudzovaní poisťnej udalosti požiaru totiž poisťovňa nevychádza z legislatívnej definície požiaru, ale z definície požiaru v poisťných podmienkach na ktorú sa odvoláva poisťná zmluva. A v poisťných podmienkach väčšiny poisťovaní sa takéto

horenie nepovažuje za požiar. V tomto prípade je to prvá (a veľmi významná) indícia pre vyšetrovateľa, ako aj pre osobu vykonávajúcu zisťovanie, že požiar bol spôsobený úmyselne.

3.3.1.5.

Drevo

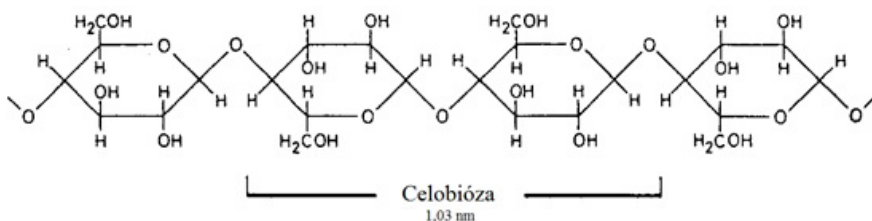
Predstavuje jeden z najrozšírenejších a technicky najvýznamnejších prírodných polymérov.

Odborná literatúra vykazuje veľmi dobrú zhodu pri popise chemického zloženia dreva. Podľa Požgaja a kol. (1997) má suché drevo rôznych drevín vysušených pri teplote 105 °C na konštantnú hmotnosť, prakticky rovnaké elementárne zloženie a priemerne obsahuje 49,5 hmot. % uhlíka, 44,2 hmot. % kyslíka a 6,3 hmot. % vodíka. Uvedené priemerné elementárne zloženie sa vzťahuje na hlavné zložky dreva, v akcesorických zložkách sa nachádza aj dusík, ktorého podľa Melcera a kol. (1977) drevo obsahuje približne 0,12 hmot. %.

Odborná literatúra, napr.: Blažej a kol. (1975), Požgaj a kol. (1997) a Kačíková a kol. (2006) rozdeľujú chemické zložky v dreve nasledovne:

1. **Hlavné zložky** – polyméry (90 až 97 %):
 - a) *Sacharidická časť* – holocelulóza (65 až 75 %):
 - celulóza (40 až 50 %),
 - hemicelulózy,
 - b) *aromatická časť* – lignín (15 až 35 %),
2. **Sprievodné (akcesorické) zložky** (3 až 10 %):
 - a) *organické*:
 - polyméry,
 - monoméry,
 - b) *anorganické*.

Celulóza je nerozvetvený homopolymér opakujúcich sa zložiek celobiózy, ktorá pozostáva z dvoch α -D-glukopyranózových lineárnych jednotiek spojených v polohách 1–4 (Požgaj a kol. 1997). Vzorec celobiózy je znázornený na obr. 3-11.



Obrázok 3-11 Celobióza: štruktúrna jednotka celulózy (Fengel a Wegener 1984)

Hemicelulózy sú viaceré heteropolysacharidy s menšou relatívnou molekulovou hmotnosťou ako celulóza. Ich priemerný polymerizačný stupeň sa najčastejšie nachádza v rozmedzí 100 až 200. Hlavnými stavebnými zložkami sú pentózy a hexózy: L-ramnóza, L-fukóza, L-arabinóza, D-xylóza, D-manóza, D-glukóza a D-galaktóza (Kačíková a kol. 2006).

Lignín je trojdimenzionálny reťazovo rozvetvený amorfný polymér pozostávajúci z fenypropánových jednotiek, ktoré sú rôzne substituované na jadre a bočnom reťazi. (Požgaj a kol. 1997).

Medzi **organické akcesorické zložky** zahŕňajú Bučko a Osvald (1997) sacharidy, fenoly, terpény a terpenoidy, acyklické kyseliny, alkoholy a bielkoviny. **Anorganické akcesorické zložky** sú anorganické (minerálne) látky, ktoré po spálení dreva ostávajú vo forme popola.

Štruktúra a ultraštruktúra dreva má podľa Solára (2001) tri úrovne: **makroskopickú**, **mikroskopickú** (delí sa na *morfologickú* a *anatomickú* hladinu) a **submikroskopickú** (rozdeľuje sa na *nadmolekulovú* a *molekulovú* hladinu).

Napriek faktu, že štruktúra a ultraštruktúra dreva spolu s jeho chemickým zložením vo významnej miere determinujú jeho vlastnosti, rozsah publikácie im nedovoľuje venovať hlbšiu pozornosť. Danú problematiku podrobne popisujú napr.: Fengel a Wegener (1984) a Požgaj a kol. (1997).

Dzurenda (2005) považuje za najvýznamnejšie chemické reakcie spojené s termickou degradáciou celulózy a hemicelulóz:

- Odštiepovanie funkčných skupín $-\text{COCH}_3$, $-\text{COOH}$, $-\text{OCH}_3$ na začiatku termického rozkladu, pri teplotách 150 až 275 °C.
- Termooxidačné reakcie na uhlíku C_{1D} –glukopyrazónovej jednotky a iných sacharidových jednotkách, pri teplotách 150 až 200 °C.
- Dehydratáciu celulózy pri teplotách 180 až 270 °C.
- Depolymerizáciu hemicelulóz štiepením glykozidických väzieb pri teplotách 200 až 210 °C.
- Depolymerizáciu celulózy, ktorá je významná termolytická reakcia polysacharidov spojená s tvorbou anhydridov – glykozánov. Nastáva pri teplotách nad 300 °C.

Pri termickom rozklade lignínu prebiehajú podľa Dzurendu (2005) nasledovné chemické reakcie:

- Odštiepovanie niektorých funkčných skupín $-\text{COOH}$, $-\text{OCOCH}_3$, $-\text{CHO}$, $-\text{OH}$, $-\text{CH}_3$, $-\text{OCH}_3$, $-\text{CH}_2\text{OH}$, pri teplotách 150 až 200 °C.
- Štiepenie C-C väzieb v propánovej časti fenypropánových jednotiek, pri teplotách nad 250 °C.
- Štiepenie éterových väzieb C-O-C₄ alkylovo-arylových, pri teplotách 270 až 290 °C.
- Rozklad fenykumarínových dimérnych jednotiek, pri teplotách 350 až 400 °C.
- Pri teplotách nad 400 °C nie sú vylúčené kondenzačné reakcie monomérnych fenolových produktov termickej degradácie za vzniku dechtov.

Z hlavných zložiek dreva sú voči termickej degradácii najmenej odolné hemicelulózy, ktoré sa rozkladajú pri teplotách 170 až 240 °C. Odolnejšia je celulóza, ktorá sa intenzívne rozkladá pri teplotách 250 až 350 °C. Aktívny rozklad lignínu, ako najodolnejšej zložky prebieha v teplotnom intervale 300 až 400 °C (Osvald 1997).

Podľa Osvalda (1997) závisí odolnosť dreva voči termickej degradácii od jeho chemického zloženia, štruktúry, hustoty, kvality povrchu, vlhkosti, termodynamických veličín a geometrického tvaru, pričom za najdôležitejšie považuje chemické zloženie.

Predstava o tepelnej odolnosti dreva môže byť urobená až na základe komplexného posúdenia všetkých vyššie uvedených vlastností, napr. nemožno tvrdiť, že ihličnaté dreviny sú odolnejšie voči termickej degradácii ako listnaté, napriek tomu, že z údajov uvádzaných napr. Blažejom a Košíkom (1985) a Požgajom a kol. (1997) vyplýva, že ihličnaté dreviny obsahujú viac celulózy a lignínu a menej hemicelulóz ako dreviny listnaté. Na termickú

odolnosť však má vplyv aj fakt, že hemicelulózy ihličnatých drevín sú tvorené hexózami a pentózami v pomere asi 1:1, zatiaľ čo v listnatých drevinách približne v pomere 1:6, ako aj vyšší obsah živíc v ihličnatých drevinách v porovnaní s listnatými.

Pre posúdenie termickej odolnosti dreva sú veľmi dôležitými parametrami jeho hustota a štruktúra, ktoré sú vzájomne veľmi úzko previazané, resp. hustota dreva je determinovaná jeho štruktúrou. Na úzke prepojenej hustoty a štruktúry dreva možno usudzovať na základe faktu, že podľa Požgaja a kol. (1997) má drevo rôznych drevín vysušené na konštantnú hmotnosť pri teplote 105 °C prakticky rovnakú hustotu drevnej substancie. Ak má drevná substancie takmer rovnakú hustotu, tak rozdielnosť hustôt rôznych drevín možno vysvetliť len rôznou štruktúrou (prítomnosťou dutín a pórov). Kvalita a kvantita dutín a pórov je daná predovšetkým štruktúrou konkrétnej dreviny (pokiaľ neberieme do úvahy chyby drevnej hmoty). Po započítaní dutín a pórov by sme už nemali hovoriť o hustote, ale o objemovej hmotnosti. Odolnosť dreva sa zvyšuje s jeho narastajúcou hustotou.

Vlhkosť, kvalita povrchu a geometrický tvar výrobku z dreva, sú v praxi determinované požiadavkami na jeho úžitkové a/alebo technologické vlastnosti.

Podobne ako pri syntetických polyméroch majú na proces horenia dreva významný vplyv aj retardéry horenia. Táto problematika je podrobne popísaná vo vedeckých prácach Mitterovej (2008) Osvaldovej a Osvalda (2013).

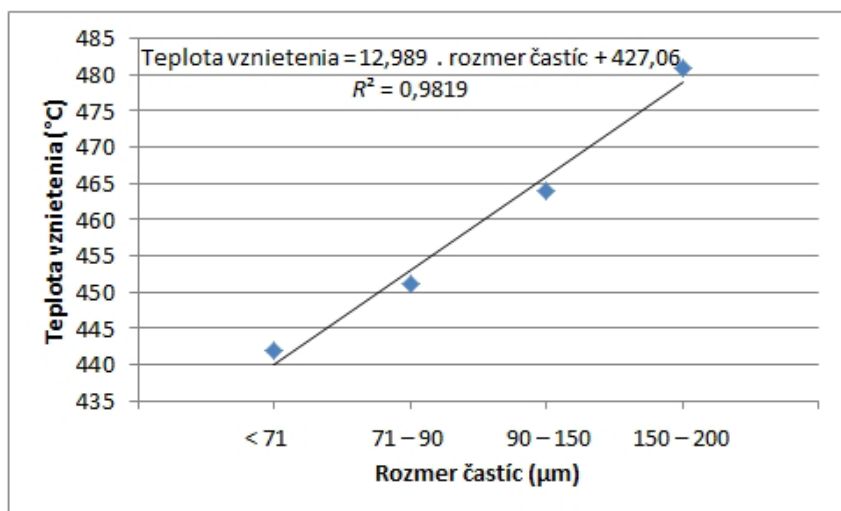
Z hľadiska zisťovania príčin vzniku požiarov je kľúčovou vlastnosťou dreva (a materiálov na báze dreva) vytváranie tuhej zuhoľnatej vrstvy na jeho povrchu počas termického zataženia (požiaru). Aplikácia tejto vlastnosti pri zisťovaní príčin vzniku požiaru je podrobne popísaná v kapitole 8 a 11.

Okrem kompaktnej (rastlej) formy dreva a materiálov na báze dreva sa pri zisťovaní príčin vzniku požiarov stretávame s drevným prachom. Damec (1998) definuje prach ako čiastočky tuhej látky s dvomi rozmermi menšími ako 0,5 mm (tretí rozmer môže byť aj väčší). Aj keď odborná literatúra a technické normy (napr. BS a NFPA) vykazujú značné rozdiely pri definovaní maximálnych rozmerov častíc prachu (podľa Abbasiho a kol. (2007) od 76 do 1000 μm), pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov môže byť prijatá Damcova (1998) definícia.

Prach sa v požiarom úseku môže vyskytovať v usadenej (aerogél) a rozvírenej forme (aerosól). Usadený prach predstavuje zvýšené požiarne riziko (v porovnaní s kompaktným materiálom) predovšetkým kvôli vyššiemu pomeru povrchu k objemu a nižšiemu koeficientu tepelnej vodivosti. Uvedené vlastnosti zvyšujú sklon materiálov k samovznieteniu a k horeniu bezplameňovým spôsobom (tlením). Rozvírený prach predstavuje riziko explózie. Explózia rozvíreného prachu môže nastať, ak je jeho koncentrácia medzi dolnou a hornou medzou výbušnosti a takto rozvírený prach je iniciovaný iniciačným zdrojom s dostatočnou energiou. Koncentračné medze výbušnosti horľavých prachov sa obvyčajne uvádzajú v g.m^{-3} . Dolná medza výbušnosti organických prachov sa pohybuje rádov v desiatkach g.m^{-3} a horná medza výbušnosti rádovo v kg.m^{-3} . Praktické využitie hornej medze je značne limitované (jej hodnota je príliš vysoká).

Dolná medza výbušnosti nie je materiálou konštantou, ale závisí od veľkosti častíc prachu, ich vlhkosti, rýchlosti a charakteru prúdenia oxidačného prostriedku (vzduchu), teploty vzduchu, teploty a času pôsobenia iniciačného zdroja a ďalších vonkajších podmienok. Vplyv veľkosti častíc prachu smrekového dreva na priemernú teplotu vznietenia (stanovenú podľa STN EN 50281-2-1:2002) ilustruje obr. 3-12.

Ako už bolo uvedené, horenie môže prebiehať homogénnym aj heterogénnym spôsobom. Rovnaký záver platí aj pre horenie rozvírených organických prachov. Eckhoff (2003) a Rockwell a Rangwala (2013) delia horenie prachov do dvoch základných mechanizmov na Nusseltov mechanizmus a plameňové horenie prchavých produktov. Pri Nusseltovom mechanizme dochádza len k heterogénnemu horeniu na povrchu častíc udržiavaného difúziou kyslíka k povrchu častíc. Pri plameňovom horení rozkladných plyných produktov dochádza ku klasickému homogénnemu horeniu. Drevné prachy horia obidvomi uvedenými mechanizmami. V prvej fáze uvoľňujú rozkladné plyné produkty horiace Nusseltovým mechanizmom, v druhej fáze nasleduje heterogénne horenie odplyneného zvyšku.



Obrázok 3-12 Závislosť teploty vznietenia rozvíreného prachu zo smrekového dreva od veľkosti jeho častíc (obr. bol zostrojený z údajov publikovaných vo vedeckej práci Martinku a kol. 2014c a výsledkov vlastného výskum)

4 Oxidačné prostriedky

Prítomnosť oxidačného prostriedku je po horľavej látke a iniciačnom zdroji treťou nevyhnutnou podmienkou pre vznik požiaru (začiatok procesu horenia).

Základné rozdelenie oxidačných prostriedkov je na **kyslíkaté** a **nekyslíkaté** (napr. fluór a chlór). Kyslíkaté oxidačné prostriedky sa ďalej rozdeľujú na:

- *čistý kyslík* (dvoj alebo trojatómová molekula kyslíka),
- *zmes plynov s kyslíkom*, ktoré pri bežnej teplote spolu nereagujú (napr. vzduch, ktorý za podmienok požiaru predstavuje najčastejší oxidačný prostriedok),
- *chemické zlúčeniny obsahujúce kyslík*, ktorý uvoľňujú pri tepelnom rozklade.

Podľa skupenstva sa oxidačné prostriedky rozdeľujú na *plynné* (napr. kyslík, fluór a chlór), *kvapalné* (napr. peroxid vodíka) a *tuhé* (napr. dichróman draselný).

Do skupiny oxidačných prostriedkov zaraďujeme látky, ktorých snaha odovzdať kyslík z molekuly (prijat elektróny) sa v styku s horľavinou prejavuje veľmi výrazne. Oxidačné schopnosti týchto látok môžu mať rôznu intenzitu. Poznáme preto silné a slabé oxidačné činidlá (Orlíková a Štroch 1999).

V nasledujúcej rade sú zoradené často používané oxidačné činidlá zoradené zľava doprava podľa klesajúcej sily oxidačného účinku: F_2 , O_3 , H_2O_2 , $HClO$, $KClO$ ($pH < 7$), PbO_2 , $KMnO_4$ ($pH < 7$), Cl_2 , $K_2Cr_2O_7$ ($pH < 7$), koncentrovaná HNO_3 a O_2 . Daná rada však platí len približne, nakoľko sila oxidačného účinku závisí od podmienok reakcie (Wichterlová 2001).

Wichterlová (2001) rozdeľuje oxidačné činidlá, ktoré pri tepelnom rozklade uvoľňujú kyslík na:

- chlórny, chlorečnan, chloristan,
- amónne oxidačné činidlá (dusičnan amónny),
- dusičnany a dusitany,
- zlúčeniny chrómu (dichróman draselný a oxid chrómový),
- manganistany (manganistan draselný),
- peroxidy (peroxid vodíka, peroxidy kovov a peroxodisírany).

Pri prevažnej väčšine požiarov je rozhodujúcim oxidačným prostriedkom **vzdušný kyslík**. Vzduch sa považuje za zmes suchého vzduchu a vodnej pary. Suchý vzduch podľa Zeleného a Slosiarika (2000) obsahuje približne 78,084 obj. % N_2 , 20,946 obj. % O_2 , 0,934 obj. % Ar a 0,03 obj. % CO_2 . Okrem uvedených plynov sa v suchom vzduchu nachádzajú stopové množstvá ostatných plynov (najmä Ne, Xe, Kr, He, H_2 a CO). Obsah vody vo forme vodnej pary je vo vzduchu pomerne variabilný (od 0 do 4 obj. %) a závisí od teploty a relatívnej vlhkosti. Vzduch bez obsahu vodnej pary sa nazýva suchý vzduch a s obsahom vodnej pary vlhký vzduch. Pre účely výpočtov v oblasti požiarnej vedy, požiarneho inžinierstva a zisťovania príčin vzniku požiarov sa vzduch zjednodušene považuje za zmes pozostávajúcu z 79 obj. % N_2 a 21 obj. % O_2 . Aj keď tento predpoklad nerešpektuje skutočné zloženie vzduchu, pre výpočty v oblasti chémie horenia je postačujúci.

Kyslík sa v atmosfére nachádza predovšetkým vo forme dvojatómových molekúl. Trojatómové molekuly kyslíka sa nazývajú ozón. Množstvo ozónu v atmosfére sa mení s nadmorskou výškou. Na základe nadmorskej výšky sa rozlišuje stratosférický a troposférický ozón. V prízemných oblastiach sa ozón za bežných podmienok nachádza len v nepatrných zlomkoch objemových percent.

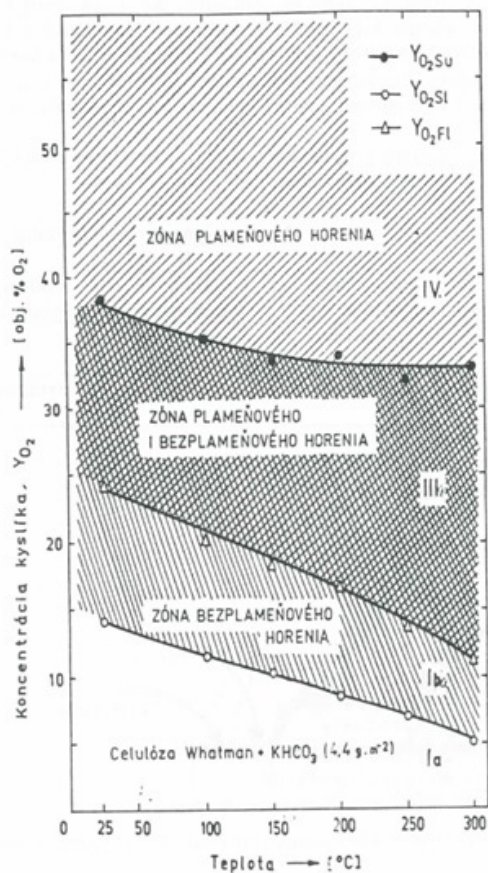
Kyslík je vysoko reaktívny plyn, bez farby, chuti a zápachu. Za vhodných podmienok reaguje s množstvom anorganických a prakticky všetkými organickými zlúčeninami. Reakcie môžu byť spontánne alebo môžu vyžadovať iniciáciu teplom, svetlom, elektrickým výbojom, chemisorpciou alebo rôznymi katalyzátormi (Orlíková a Štroch 1999).

V atmosfére so zvýšeným obsahom kyslíka (nad 21 obj. %) sa horľavé látky stávajú požiarne nebezpečnejšími – na ich iniciáciu je potrebná menšia energia, majú podstatne nižšiu teplotu vznietenia, širšie koncentračné medze horľavosti a výbušnosti a väčšiu rýchlosť horenia. Oleje a tuky sa v atmosfére stlačeného kyslíka samovznecujú. Dokonca mnohé materiály, ktoré sú považované za nehorľavé môžu v atmosfére čistého kyslíka alebo s vysokým obsahom kyslíka horieť. Oxidačná schopnosť nie len kyslíka, ale prakticky všetkých oxidačných prostriedkov narastá s ich narastajúcim tlakom. Rovnako oxidačná schopnosť kvapalného kyslíka je vyššia, ako plyného kyslíka (Zelený a Slosiarik 2000).

Koncentrácia kyslíka má spolu s teplotou rozhodujúci vplyv na spôsob horenia (plameňové a bezplameňové horenie) celulóзовých materiálov. Závislosť spôsobu horenia čistej celulózy Whatman impregnovanej hydrogenuhličitanom draselným – KHCO_3 (plošná hustota impregnácie bola $4,4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), počas skúšky metódou vysokoteplotného kyslíkového čísla, ilustruje obr. 4-1. Na obr. 4-1 sú tri zóny oddelené limitnými koncentraciami kyslíka. Prvá limitná koncentrácia je dolná limitná koncentrácia kyslíka pre bezplameňové horenie $Y_{\text{O}_2\text{SI}}$. Pod touto koncentraciou kyslíka za uvedených teplôt nedochádza k plameňovému ani bezplameňovému horeniu vzorky. Druhá limitná koncentrácia je dolná limitná koncentrácia plameňového a bezplameňového horenia $Y_{\text{O}_2\text{FI}}$. Nad touto koncentraciou dochádza za podmienok skúšky (zapálenie vzorky plameňom) k horeniu vzorky plameňovým spôsobom. Ak po dosiahnutí koncentrácie $Y_{\text{O}_2\text{FI}}$ dôjde k potlačeniu plameňa prúdom oxidu uhličitého, plameň zhasá a proces horenia ďalej pokračuje bezplameňovým spôsobom. Tretia limitná koncentrácia je horná limitná koncentrácia plameňového horenia $Y_{\text{O}_2\text{Su}}$. Pri koncentrácii kyslíka vyššej ako $Y_{\text{O}_2\text{Su}}$, ak je plameň potlačený prúdom oxidu uhličitého zhasá a vzápätí dochádza k opätovnému spontánnemu vznieteniu a horenie pokračuje plameňovým spôsobom.

Popísané limitné koncentrácie kyslíka sa vzťahujú na spôsob horenia a nemôžu byť zamieňané s limitným kyslíkovým číslom.

Ako materiál umožňujúci popísať alternatívu, kedy sa na závislosti spôsobu horenia od teploty a koncentrácie kyslíka nachádzajú štyri zóny bola vybraná čistá celulóza impregnovaná hydrogenuhličitanom draselným. Existujú však aj materiály, napr. čistá (neimpregnovaná) celulóza, ktorá má iba dve zóny ohraničené dolnou limitnou koncentraciou plameňového horenia. Tieto materiály horia len plameňovým spôsobom. Okrem koncentrácie kyslíka spôsob horenia závisí od fyzikálnej formy materiálu.

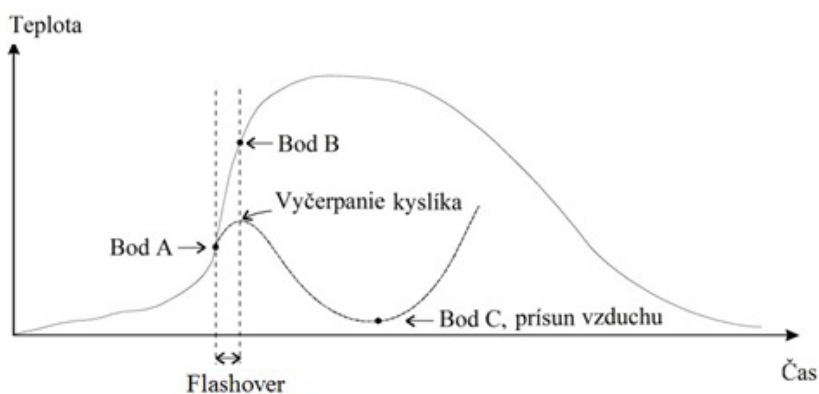


Obrázok 4-1 Závislosť spôsobu horenia celulózy impregnovanej KHCO_3 od teploty a koncentrácie kyslíka (Balog 1999)

Vplyv prístupu vzdušného kyslíka do požiarneho úseku na rozvoj vnútorného požiaru ilustruje obr. 4-2. Od bodu A sú v princípe možné tri spôsoby rozvoja požiaru. Pri dostatočnom prísune vzduchu (dobře odvetraný požiar) dôjde k veľmi rýchlemu rozvoju požiaru z bodu A do bodu B (flashover). Ak je v priestore nedostatok kyslíka na ďalší rozvoj požiaru (nedostatočne odvetraný požiar) ustane plameňové horenie, začnú sa pod stropom hromadiť plynné produkty termického rozkladu a v požiarom úseku začne klesať teplota. Po zmiešaní produktov termického rozkladu so vzduchom (bod C) tieto zhoria veľmi rýchlo, až explozívne. K zmiešaní plynných produktov termického rozkladu so vzduchom môže dôjsť buď vniknutím vzduchu do požiarom zasiahnutého priestoru (backdraft) alebo ich únikom do príľahlých priestorov (explózia dymu). Pokiaľ do požiarom zasiahnutého priestoru nevnikne vzduch alebo plynné produkty termického rozkladu neopustia tento priestor, môže nastať úplné uhasenie požiaru (Karlsson a Quintiere 2000).

Flashover je nelineárna forma rozvoja požiaru z lokálneho požiaru do plne rozvinutého požiaru. Mechanizmus flashover je založený na prehriatí stropu z lokálneho požiaru na teplotu 500 až 600 °C. Hustota tepelného toku zo stopu na podlahu za týchto podmienok dosahuje 15 až 25 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ (v závislosti od emisivity povrchu stropu), čo sú

kritické podmienky pre zapálenie väčšiny horľavých materiálov (počas veľmi krátkej indukčnej periódy), ktoré tvoria súčasť bežného vybavenia stavieb (drevo a drevné materiály a väčšina plastov). Jav flashover môže byť teda definovaný, ako zapálenie prakticky všetkých horľavých materiálov v miestnosti (vo veľmi krátkom časovom intervale) tepelnou radiáciou zo stropu prehriateho lokálnym požiarom. (Podobné myšlienky uvádzajú Karlsson a Quintiere 2000). Najväčšia časť tepla sa prenáša z lokálneho požiaru na stop tepelnou konvekciou v horúcich spalinách horenia, preto sa za podmienok požiaru považujú za dominantné spôsoby prenosu tepla tepelná radiácia (vo fáze post-flashover) a tepelná konvekcia (vo fáze pre-flashover).



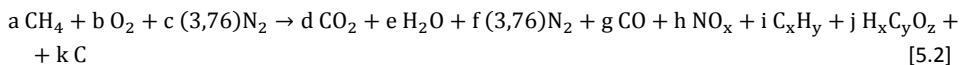
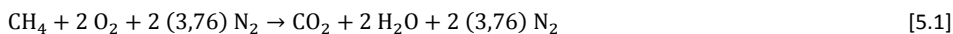
Obrázok 4-2 Závislosť teploty požiaru od prístupu vzduchu do požiarneho úseku (Bengtsson 1998)

5 Chémia horenia

Proces horenia je oxidačno-redukčná reakcia medzi horľavou látkou a oxidačným prostriedkom. Podľa Kačíkovej (2001) každá oxidačno-redukčná reakcia pozostáva z dvoch neoddeliteľných polyreakcií, nazývaných **oxidácia** a **redukcia**. Za oxidáciu sa v minulosti považovala chemická reakcia, pri ktorej sa látka zlučovala s kyslíkom na oxidy. Opačný pochod sa nazýval redukcia. V súčasnosti pod pojmom oxidácia rozumieme proces, pri ktorom látka, ktorá sa oxiduje stráca elektróny, opačný pochod označujeme ako redukciu. Oxidačný prostriedok je látka, ktorá počas oxidačno-redukčnej reakcie prijíma elektróny a pritom sa redukuje. Horľavina je látka, ktorá v oxidačno-redukčnej reakcii elektróny odovzdáva a pritom sa oxiduje (Zelený a Slosiarik 2000).

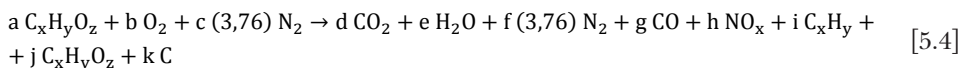
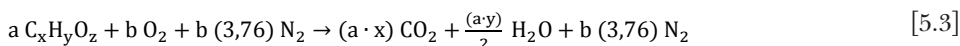
Horenie sa delí na **dokonalé** a **nedokonalé**. Pri dokonalom horení vznikajú iba konečné produkty oxidácie, ktoré sa označujú ako spaliny. Konečným oxidačným produktom uhlíka je oxid uhličitý (CO_2), vodíka voda (H_2O), síry oxid siričitý (SO_2) a fosforu oxid fosforečný (P_4O_{10}). Halogény by sa za podmienok dokonalého horenia mali teoreticky uvoľniť vo forme dvojatómovej molekuly (F_2 , Cl_2 a Br_2), za podmienok reálneho požiaru však vo zvýšenej miere vznikajú ich zlúčeniny s vodíkom (HF , HCl a HBr). Počas podmienok reálneho požiaru vznikajú v obmedzenej miere z halogénov aj iné chemické zlúčeniny. Nevyhnutnou, nie však postačujúcou, podmienkou dokonalého horenia je dostatočný prístup vzduchu do zóny horenia. Pri nedokonalom horení vznikajú spodiny horenia (v požiarom inžinierstve definujeme spodiny horenia ako zmes konečných produktov oxidácie (spaliny) s produktmi nedokonalého horenia). Najdôležitejšími produktmi nedokonalého horenia sú oxid uhoľnatý (CO) – z hľadiska toxicity aj účinnosti horenia a kyanovodík (HCN) – z hľadiska toxicity. Okrem uvedených spodín horenia vzniká pri horení organických látok množstvo ďalších chemických zlúčenín (napr. karbonylové zlúčeniny, polycyklické aromatické uhľovodíky, oxidy dusíka (NO_x) a pod.).

Dokonalé horenie metánu vo vzduchu reprezentuje rovnica [5.1] a nedokonalé horenie metánu vo vzduchu rovnica [5.2].



a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k: stechiometrické koeficienty (-)

Dokonalé horenie všeobecnej organickej látky obsahujúcej uhlík a vodík popisuje rovnica [5.3] a nedokonalé horenie rovnica [5.4].

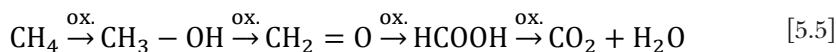


Za reálnych podmienok (s výnimkou spaľovania plyných palív v špeciálnych reaktoroch), prebieha horenie uhľovodíkov, prakticky vždy podľa rovnice [5.4] – rovnica nedokonalého horenia. Rozdiel medzi dokonalým a nedokonalým horením za reálnych podmienok je v množstve vzniknutých spodín horenia. Pri dokonalom horení vznikajú spodiny horenia v zanedbateľnom množstve. Naproti tomu počas nedokonalého horenia vznikajú v množstve, ktoré je významné buď z hľadiska toxicity vzniknutých produktov horenia alebo z hľadiska účinnosti horenia (najvyššia účinnosť sa dosahuje vždy pri dokonalom horení).

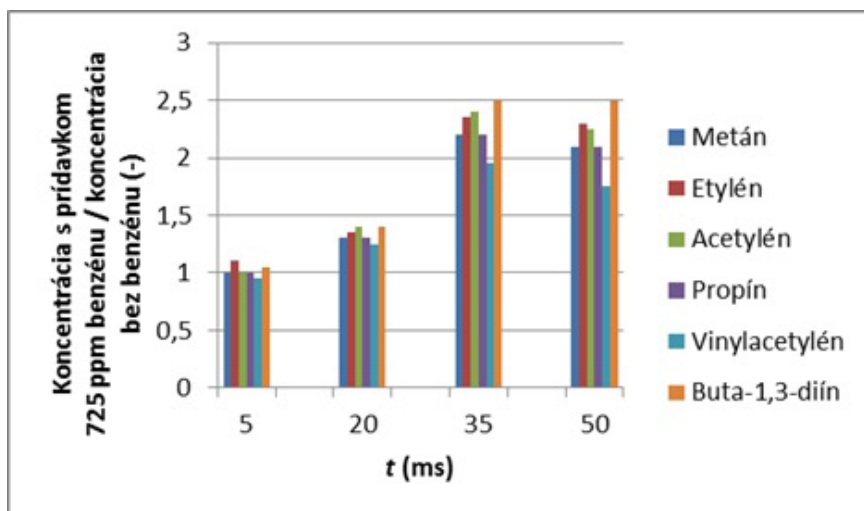
Na prvý pohľad je možné z rovnice [5.4] dospieť k mylnému záveru, že počas nedokonalého horenia organickej látky pozostávajúcej z uhlíka, vodíka a prípadne kyslíka môže vzniknúť len niekoľko chemických zlúčenín. Tu si však treba uvedomiť, že sumárny vzorec $C_x H_y$ a $C_x H_y O_z$, reprezentuje v podstate všetky chemické zlúčeniny pozostávajúce z uhlíka a vodíka, resp. uhlíka, vodíka a kyslíka. Týchto chemických zlúčenín môže byť teoreticky neobmedzené množstvo (v súčasnosti je známych okolo štyri milióny organických zlúčenín uhlíka, pričom neustále pribúdajú ďalšie). Počas horenia organických polymérov (ani za predpokladu, že okrem uhlíka a vodíka obsahujú aj ďalšie atómy, ako napr. halogény) však nevzniká až také vysoké množstvo chemických látok. Podľa Ladomerského (1999) sa v spodinách horenia zo spaľovní, na úrovni najlepších dostupných technológií, nachádza niekoľko desiatok dioxínov, približne 250 identifikovaných zlúčenín uhľovodíkov a viac ako 50 hmot. %, zatiaľ neidentifikovaných organických látok (pravdepodobne uhľovodíkov).

Okrem chemických zlúčenín so všeobecným sumárnym vzorcom $C_x H_y$, resp. $C_x H_y O_z$, vznikajú aj oxidy dusíka (NO_x). Tieto zlúčeniny môžu vzniknúť aj pri dokonalom horení látky so sumárnym vzorcom $C_x H_y$, resp. $C_x H_y O_z$ v atmosfére vzduchu (zlučovaním rozkladných produktov horľavej látky so vzdušným dusíkom – tzv. rýchle oxidy dusíka). Množstvo vzniknutých oxidov dusíka je pri tomto mechanizme závislé predovšetkým od teploty v zóne horenia.

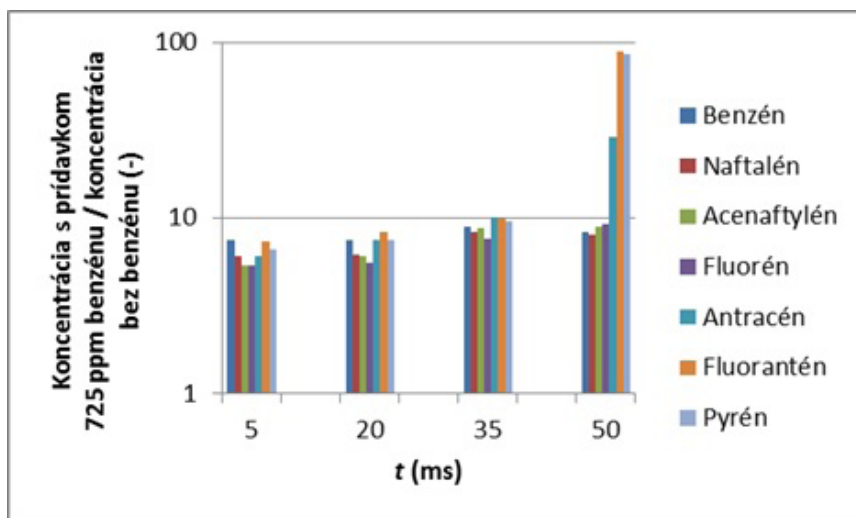
Mechanizmus, ako môžu z jednoduchej organickej látky (metánu) počas termického rozkladu vzniknúť variabilné chemické zlúčeniny ilustruje rovnica [5.5].



Za podmienok horenia však môžu vzniknúť aj, na prvý pohľad, neočakávané chemické zlúčeniny. Variabilitu chemického zloženia spodín horenia dokazuje obr. 5-1 (vznik polycyklických aromatických uhľovodíkov z acetylénu mechanizmom tzv. anorganickej polymerizácie). Za podmienok reálneho požiaru navyše takmer nikdy nehorí iba jeden druh materiálu. Významný vplyv na chemické zloženie a množstvo vzniknutých spodín horenia môže mať zmiešanie rozkladných produktov z rôznych materiálov. Vplyv prídania 725 ppm (0,0725 obj. %) benzénu do etylénového plameňa (horiaceho v atmosfére vzduchu pri ekvivalentnom pomere 1,8 – teda pri miernom nedostatku kyslíka) na zmenu koncentrácie vybraných ľahkých uhľovodíkov v spodinách horenia ilustruje obr. 5-2. Podobne vplyv primiešania 725 ppm (0,0725 obj. %) benzénu do etylénového plameňa

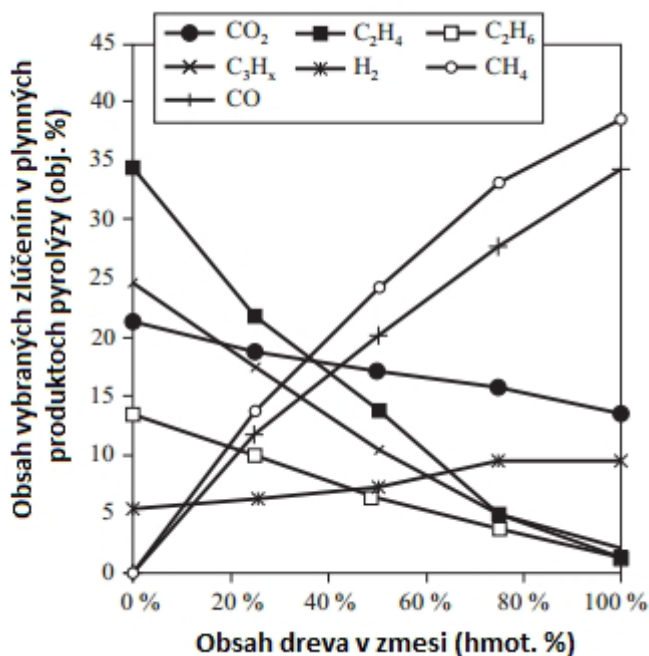


Obrázok 5-2 Časová závislosť pomeru koncentrácií vybraných ľahkých uhľovodíkov v etylénovom plameni s prídavkom 725 ppm benzénu ku koncentráciám bez pridaného benzénu (Stroud a kol. 2007)



Obrázok 5-3 Časová závislosť pomeru koncentrácií vybraných polyaromatických uhľovodíkov v etylénovom plameni s prídavkom 725 ppm benzénu ku koncentráciám bez pridaného benzénu (Stroud a kol. 2007)

Druh a množstvo chemických látok v spodinách horenia závisí od chemického zloženia horiaceho materiálu a od chemického zloženia oxidačného prostredia. Prakticky pri všetkých vnútorných aj vonkajších požiaroch je dominantným oxidačným prostriedkom vzdušný kyslík. Vplyv elementárneho zloženia horľavej látky na chemické zloženie spodín horenia ilustruje tabuľka 5-1.



Obrázok 5-4 Vplyv obsahu dreva v zmesi s PE na množstvo vybraných zlúčenín v plynných produktoch pyrolýzy (Grieco a Baldi 2012)

Tabuľka 5-1 Odhad spodín horenia z elementárneho zloženia polyméru

Elementárne zloženie	Príklad	Možné spodiny horenia
C + H	PE, PP, PS, PF	CO, CO ₂ , H ₂ O, uhľovodíky (nasýtené, nenasýtené, aromatické, polycyklické) a kyslíkaté zlúčeniny (napr. aldehydy, ketóny) s výnimkou podmienok pyrolýzy
C + H + O	drevo, bavlna PES, PMMA PET, PC	ako pri (C + H), ale s vyšším obsahom oxidovaných organických zlúčenín
C + H + N	ABS, PAN	ako pri (C + H), ale s HCN, N ₂ , NO _x , NH ₃ a dusíkatými zlúčeninami
C + H + N + O	PUR, PA, MF	ako pri (C + H + N), ale s vyšším obsahom oxidovaných organických zlúčenín
C + H + N + O + S	vlna	ako pri (C + H + N), ale s SO ₂ , H ₂ S, ...
C + H + Cl	PVC	ako pri (C + H), ale s HCl a chlórovanými organickými látkami
C + (H) + F	PTFE	ako pri (C + H), ale s HF a fluórovanými organickými látkami

Prameň: Masařík a kol. (1999)

Okrem chemického zloženia horľavej látky a oxidačného prostriedku má na proces horenia, ako aj množstvo a chemické zloženie zlúčenín v splodinách horenia významný vplyv množstvo oxidačného prostriedku (vzdušného kyslíka) v zóne horenia. Množstvo kyslíka v požiarom úseku zasiahnutom požiarom závisí od rýchlosti jeho spotreby na proces horenia a rovnako od rýchlosti prívodu čerstvého vzduchu od požiarneho úseku (interiéru). Rýchlosť spotreby kyslíka na horenie narastá s narastajúcou plochou požiaru (s narastajúcou rýchlosťou uvoľňovania tepla). Rýchlosť prívodu vzduchu do požiarneho úseku závisí od rozdielu teplôt medzi interiérom a exteriérom, ďalej od plochy a výšky otvorov (okien) a od rýchlosti prúdenia vzduchu v exteriéry (rýchlosť vetra).

Koncentrácia kyslíka v požiarom úseku, počas požiaru, klesá v dôsledku jeho spotreby na proces horenia, ako aj následkom jeho zriedovania splodinami horenia. Exaktné vyjadrenie množstva oxidačného prostriedku (vzhľadom na množstvo horľavej látky) v zóne horenia umožňuje ekvivalentný pomer podľa rovnice [5.6], ktorú uvádzajú napr. Karlsson a Quintiere (2000).

$$\phi = \frac{m_f/m_{ox}}{r} \quad (-) \quad [5.6]$$

ϕ : ekvivalentný pomer (-)

m_f : hmotnosť plynného paliva v zóne horenia (g alebo kg)

m_{ox} : hmotnosť kyslíka v zóne horenia (g alebo kg)

r : stechiometrický koeficient – hmotnosť paliva na dokonalé spálenie ktorého je potrebná jednotková hmotnosť kyslíka (-)

Pri ekvivalentnom pomere rovnom jednej prebieha proces horenia pri stechiometrickom pomere medzi palivom a oxidačným prostriedkom. Pri ekvivalentnom pomere nižšom ako jedna prebieha proces horenia pri nadbytku vzduchu (oxidačného prostriedku) a pri ekvivalentnom pomere vyššom ako jedna prebieha proces horenia pri nedostatku vzduchu.

V energetike sa môžeme stretnúť s vyjadrením množstva oxidačného prostriedku (vzdušného kyslíka) vzhľadom na množstvo paliva prostredníctvom koeficienta prebytku vzduchu λ . Koeficient prebytku vzduchu je prevrátenou hodnotou ekvivalentného pomeru. V oblasti požiarnej vedy, ako aj požiarneho inžinierstva a zisťovania príčin vzniku požiarov sa takmer výlučne používa ekvivalentný pomer. Ekvivalentný pomer sa vzťahuje priamo na zónu horenia, teda na základe údajov o koncentrácii kyslíka v priestore (požiarom úseku) nie je možné vyvodiť jednoznačný záver o dokonalom, resp. nedokonalom horení.

Miera dokonalosti horenia môže byť posúdená na základe výťažku vybraných zložiek splodín horenia. Výťažok zložky i splodín horenia definujú Karlsson a Quintiere (2000) ako množstvo zlúčeniny i (napr. oxid uhoľnatý – CO, kyanovodík – HCN, chlorovodík – HCl a pod.), ktorá sa uvoľní pri zhorení jednotkového množstva materiálu. Maximálny výťažok zložky i , citovaní autori definujú ako maximálny možný výťažok stanovený na základe stechiometrie. Výťažok zložky i splodín horenia sa počíta podľa rovnice [5.7] (Karlsson a Quintiere 2000).

$$y_i = \frac{m_i}{m_f} \quad (\text{g.g}^{-1} \text{ alebo g.kg}^{-1}) \quad [5.7]$$

y_i : výťažok zložky i (g.g⁻¹ alebo g.kg⁻¹)

m_i : hmotnosť zložky i uvoľnenej do splodín horenia (g)

Za reálnych podmienok dochádza aj za podmienok dostatočného prístupu vzduchu (ekvivalentný pomer je nižší ako 1) k uvoľňovaniu splodín nedokonalého horenia (predovšetkým CO). Rozdiel medzi dokonalým a nedokonalým horením je len v množstve uvoľnených splodín nedokonalého horenia. Vplyv ekvivalentného pomeru na výťažok oxidu uhoľnatého z vybraných organických materiálov ilustruje tabuľka 5-2.

Tabuľka 5-2 Výťažky CO pri horení vybraných materiálov pri dostatočnom a nedostatočnom prístupe vzduchu

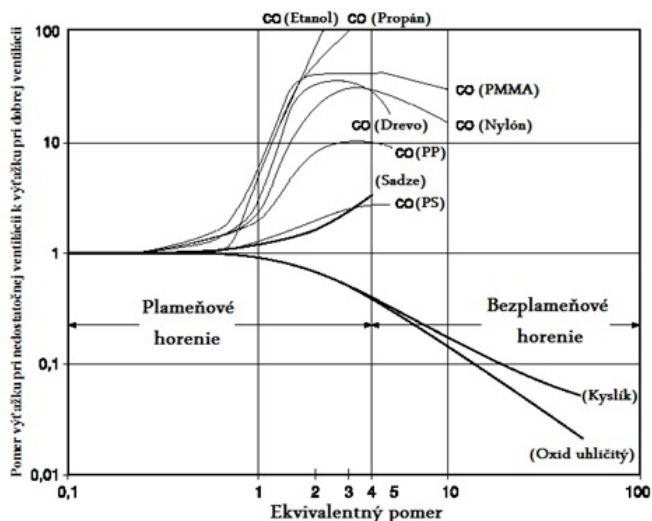
Materiál	$\varphi < 1$ $y_{CO} \text{ (g}\cdot\text{g}^{-1}\text{)}$	$\varphi > 1$ $y_{CO} \text{ (g}\cdot\text{g}^{-1}\text{)}$
Propán	0,005	0,23
Etanol	0,001	0,22
Polymetylmetakrylát	0,01	0,19
Drevo	0,005	0,14
Polyvinylchlorid	0,063	0,4

Prameň: Tewarson (1995)

Rovnica [5.7] môže byť rovnako aplikovaná aj pre výťažky tuhých splodín horenia (sadzí) a nezhoreného paliva. Pri tuhých materiáloch je však korektnjším termínom, ako výťažok nezhoreného paliva termín výťažok uhľovodíkov, nakoľko chemické zloženie tuhého paliva a chemické zloženie nezhorených uhľovodíkov v splodinách horenia sa líši (následkom termického rozkladu paliva). Nespálené uhľovodíky sa v anglicky písanej literatúre označujú skratkou THC (Total Hydro Carbons – suma uhľovodíkov). U nás sa môžeme stretnúť aj s pojmom celkový organický uhlík (TOC z anglického Total Organic Carbon). Tento termín má však v rôznych odboroch rôzny význam (primárne sa používa ako analytický skupinový ukazovateľ, napr. pri hodnotení kvality vôd) a v porovnaní s termínom THC je navyše menej presný, preto v ďalších častiach budeme na vyjadrenie množstva nespáleného paliva používať termín suma uhľovodíkov.

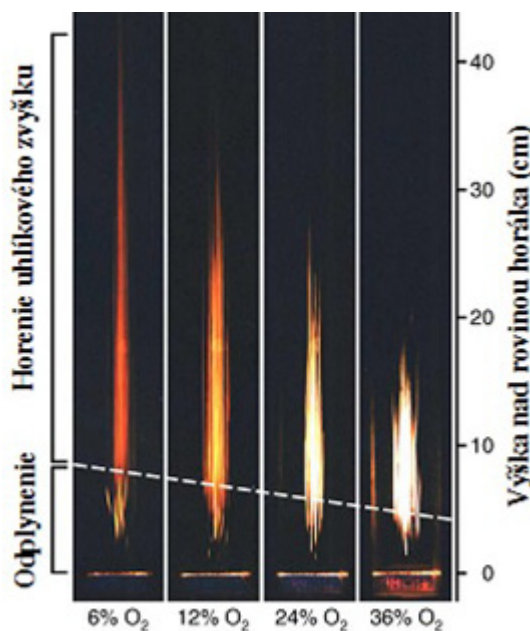
Vplyv ekvivalentného pomeru na pomer medzi výťažkami CO, CO₂, O₂ a sadzí pri ekvivalentnom pomere rovnom 0,1 k výťažkom uvedených zložiek pri vyšších ekvivalentných pomeroch (od 0,1 do 10) ilustruje obr. 5-5. Pri obr. 5-5 je však potrebné upozorniť, že termín výťažok kyslíka nie je úplne presný, nakoľko kyslík nie je výsledkom chemickej reakcie medzi produktmi termického rozkladu a vzdušným kyslíkom (ako vznikajú spaliny, resp. splodiny horenia), ale ide o kyslík, ktorý sa nespotreboval na horenie.

Z obr. 5-5 vyplývajú dva zaujímavé fakty. Prvým je skutočnosť, že výťažok sadzí nezávisí od chemického zloženia horiacej látky, ale len od ekvivalentného pomeru. Druhým je skutočnosť, že aj prechod z plameňového horenia na bezplameňové závisí prakticky iba od ekvivalentného pomeru. Tvrdenie, že spôsob horenia (plameňové alebo bezplameňové) závisí iba od ekvivalentného pomeru by sa nám mohlo zdať v rozpore s každodennou skúsenosťou, kedy môžeme pozorovať, že sklon k bezplameňovému horeniu má len určitá skupina materiálov (napr. drevo v dezintegrovannej forme, tabak a pod.). V skutočnosti aj pri týchto materiáloch závisí spôsob horenia od ekvivalentného pomeru medzi palivom a oxidačným prostriedkom v zóne horenia. Forma materiálu však dokáže zásadným spôsobom ovplyvniť ekvivalentný pomer v zóne horenia (materiál v dezintegrovannej forme (napr. prach) má podstatne väčší merný povrch, ako materiál v kompaktnnej forme a z toho vyplývajú aj vyššia rýchlosť tvorby rozkladných produktov a vyššia hodnota ekvivalentného



Obrázok 5-5 Vplyv ekvivalentného pomeru na výťažok sadzí, CO a CO₂ pre vybrané látky (Tewarson 1995)

pomeru). Dôkazom je skutočnosť, že napr. v čistom kyslíku horia plameňovým spôsobom aj materiály, ktoré za bežných podmienok horia bezplameňovým spôsobom (napr. drevný prach). Aj keď za predpokladu, že obsah prchavej horľaviny (látky, ktoré sa počas termického zaťaženia materiálu uvoľnia vo forme horľavých plynov) neobsahuje v látke kritickú hodnotu materiál plameňovým spôsobom nebude horieť ani v čistom kyslíku. Vplyv koncentrácie kyslíka (a teda nepriamo aj ekvivalentného pomeru) na spôsob horenia uhlia ilustruje obr. 5-6.



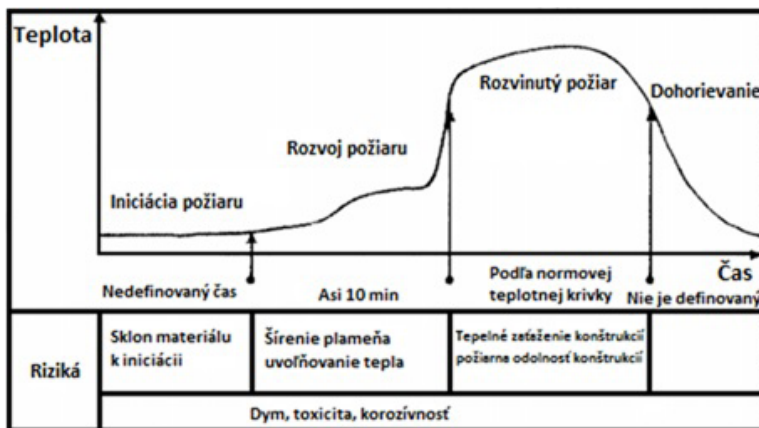
Obrázok 5-6 Vplyv koncentrácie kyslíka na proces horenia uhoľného prachu (Murphy a Shaddix 2006)

6

Dynamika rozvoja vnútorného požiaru

Kľúčovú úlohu pri zisťovaní príčin vzniku požiarov hrajú poznatky z dynamiky rozvoja požiaru. Cieľom dynamiky rozvoja požiaru je matematicky popísať rozvoj požiaru a šírenie jeho sprievodných javov (splodín horenia a tepla). Dynamika rozvoja požiaru teda umožňuje predikciu rozvoja požiaru od momentu jeho iniciácie cez lokálny požiar, prechod do plne rozvinutého požiaru (najčastejšie flashoverom), plne rozvinutého požiaru až do úplného vyhorenia. Cieľom zisťovania príčin vzniku požiarov je naopak zo známych faktov a zanechaných stôp po požiari zistiť miesto a príčinu jeho vzniku. Zisťovanie príčin vzniku požiarov teda môže byť s určitou mierou zjednodušenia považované za reverzný postup k dynamike rozvoja požiaru.

Podmienky počas vnútorného požiaru je najexaktnejším spôsobom možné vyjadriť teplotu a koncentráciu kyslíka vo vnútri požiarneho úseku. Pribeh teplôt typického vnútorného požiaru ilustruje obr. 6-1.



Obrázok 6-1 Časovo teplotná krivka vnútorného požiaru (Balog a Kvarčák 1999)

Prvou fázou rozvoja požiaru je iniciácia. V prípade, že dominantnú časť požiarneho zaťaženia požiarneho úseku tvoria tuhé horľavé látky nasleduje po iniciácii pozvoľný rozvoj požiaru, ktorý závisí predovšetkým od vlastností horiaceho materiálu (jeho vyhrevnosti, rýchlosti odhorievania a rýchlosti šírenia plameňa po jeho povrchu). Táto fáza rozvoja požiaru sa nazýva aj lokálny požiar. Prechod vnútorného požiaru z pozvoľného rozvoja (lokálneho požiaru) do fázy plne rozvinutého požiaru má vo väčšine prípadov nelineárnu (skokovú) formu. Najčastejšie dochádza k prechodu lokálneho požiaru do plne rozvinutého požiaru mechanizmom nazývaným flashover. Termín flashover sa v odbornej literatúre niekedy prekladá ako celkové priestorové vzplanutie (napr. Filipi 2003), ale

najčastejšie sa tento termín do slovenčiny neprekladá. Podstatne menej častým mechanizmom prechodu lokálneho požiaru do plne rozvinutého požiaru je backdraft, ktorý sa niekedy prekladá ako celkové ventilačné vzplanutie (napr. Filipi 2003), ale ani tento termín sa zvyčajne neprekladá. Ďalším významným nelineárnym mechanizmom rozvoja požiaru je explózia dymu (v angličtine smoke gas explosion).

Flashover je mechanizmus rozvoja požiaru, kedy teplo uvoľňované z lokálneho požiaru prehreje strop na teplotu 500 až 600 °C, čoho výsledkom je tepelná radiácia na podlahu s hustotou tepelného toku 15 až 25 kW.m⁻². Uvedená hustota tepelného toku je kritická pre väčšinu materiálov, ktoré tvoria bežné vybavenie interiérov stavieb. Výsledkom je, že po dosiahnutí uvedených podmienok dôjde k zapáleniu takmer všetkých horľavých látok v požiarom úseku vo veľmi krátkom časovom intervale. Flashover je najčastejším spôsobom prechodu požiaru z lokálneho do plne rozvinutého. Tento jav nemá tlakové účinky na okolie. Odlišná situácia je však pri požiaroch, ktoré nemajú na svoj rozvoj dostatok oxidačného prostriedku. V tomto prípade môže dôjsť k uhaseniu plameňa lokálneho požiaru, ale tepelné žiarenie zo stropu na podlahu naďalej spôsobuje termický rozklad horľavých materiálov, ktoré uvoľňujú horľavé plyny. Následkom nedostatku kyslíka nemajú uvoľnené plyny s čím reagovať a hromadia sa pod stropom. Po otvorení otvoru v požiarom úseku (okno alebo dvere) dôjde k vniknutiu vzduchu (vzdušného kyslíka) do požiarneho úseku a následne k veľmi rýchlemu alebo dokonca explozívne mu zhoreniu nahromadených rozkladných plynov. Tento jav sa nazýva backdraft. Tento jav nastáva podstatne menej často, ako flashover. Dôvodom je skutočnosť, že na vznik tohto javu musí byť požiarom úsek utesnený, pričom k otvoreniu otvoru musí dôjsť v relatívne krátkom časovom intervale (ak sa otvor otvorí pred nahromadením rozkladných produktov prejde požiar do plne rozvinutej fázy mechanizmom flashover, ak sa otvor otvorí príliš neskoro teplota v požiarom úseku klesne pod kritickú hodnotu a iniciácia rozkladných produktov po ich zmiešaní so vzduchom nenastane). Tento jav je nebezpečný predovšetkým kvôli jeho tlakovými účinkami na okolie. Podobným javom je explózia dymu. Jediným rozdielom medzi backdraftom a explozívnym horením dymu je, že pri explozívnom horení dymu nevnikne vzduch do priestoru zasiahnutého požiarom, ale rozkladné horľavé plyny uniknú do susedných priestorov a teda spôsobujú rýchle šírenie požiaru do ďalších častí stavby (podobné myšlienky uvádzajú Karlsson a Quintiere 2000). Termín explozívne horenie dymu je však čiastočne zavádzajúci, nakoľko dym sa obvyčajne definuje ako zmes tuhých a kvapalných častíc rozptýlených v plynnej fáze (napr. vo vzduchu). Pri explózii dymu sú však rozhodujúce rozkladné plynné produkty.

6.1.

Rýchlosť uvoľňovania tepla z rozvíjajúceho sa požiaru

Rýchlosť uvoľňovania tepla patrí medzi základné parametre charakterizujúce každý požiar. Aj keď sa rýchlosť uvoľňovania tepla najčastejšie meria pre jednotlivé materiály alebo výrobky nie je materiálovou konštantou, ale vlastnosťou závislou okrem vlastností materiálu predovšetkým od hustoty tepelného toku dopadajúceho na jeho povrch a od prívodu čerstvého vzduchu. Za podmienok reálneho požiaru závisí hustota externého tepelného toku dopadajúceho na povrch horiaceho materiálu od teploty v priestore – pod

stropom (tá závisí spätne od rýchlosti uvoľňovania tepla z požiaru) a od možnosti akumulácie horúcich splodín horenia pod stropom. V reálnych priestoroch je navyše požiarne zaťaženie tvorené rôznymi materiálmi (s variabilným pomerom hmotností), čo exaktný výpočet rýchlosti uvoľňovania tepla za podmienok požiaru komplikuje. Pre uľahčenie, resp. umožnenie výpočtu rýchlosti uvoľňovania tepla počas požiaru sa preto priestory (požiarne úseky) posudzujú ako celky, pričom sa vychádza zo štatistického vyhodnotenia údajov o rýchlosti uvoľňovania tepla, ktoré boli získané experimentálne.

V súčasnosti existuje pomerne veľké množstvo spôsobov výpočtu (presnejšie by však bolo hovoriť o odhade) rýchlosti uvoľňovania tepla počas požiaru. V praxi sa na výpočet rýchlosti uvoľňovania tepla vo fáze rozvoja požiaru veľmi často využívajú tzv. t-kvadratické modely rozvoja požiaru. Tento spôsob výpočtu je popísaný napr. v prílohe E k EN 1991-1-2:2002. V zmysle citovanej technickej normy sa priestory podľa rýchlosti rozvoja požiaru delia do štyroch kategórií (priestory s nízkou, strednou, vysokou a veľmi vysokou rýchlosťou rozvoja požiaru) tak, ako to ilustruje tabuľka 6-1. Priestory sa do jednotlivých kategórií delia na základe času za ktorý dosiahnu po iniciácii referenčnú rýchlosť uvoľňovania tepla (1 MW). Okrem toho sú v tabuľke 6-1 uvedené aj hodnoty maximálnej rýchlosti uvoľňovania tepla (prepočítané na jednotku plochy), pre požiare v jednotlivých priestoroch. Závislosť rýchlosti uvoľňovania tepla požiaru (v požadovanom čase) sa počíta podľa rovnice [6.1], ktorá je uvedená v citovanej technickej norme. Rovnica [6.1] je použiteľná len na fázu rozvoja požiaru (teda do času, kým rýchlosť uvoľňovania tepla nedosiahne hodnotu 1 MW). Hodnota 1 MW sa vzťahuje na celú plochu požiaru (nie je prepočítaná na jednotku plochy).

$$\text{HRR} = 10^6 \cdot \left(\frac{t}{t_a}\right)^2 \quad (\text{MW}) \quad [6.1]$$

HRR: rýchlosť uvoľňovania tepla vo fáze rozvoja požiaru (MW)

t : čas (od iniciácie) pre ktorý sa počíta rýchlosť uvoľňovania tepla (s)

t_a : čas potrebný na dosiahnutie referenčnej rýchlosti uvoľňovania tepla 1 MW (s)

Tabuľka 6-1 Rýchlosť rozvoja požiaru vo vybraných priestoroch

Priestor	Rýchlosť rozvoja požiaru (-)	t_a (s)	Maximálna rýchlosť uvoľňovania tepla (kW.m ⁻²)
Doprava (priestory pre verejnosť)	nízka	600	250
Byty	stredná	300	250
Nemocničné izby	stredná	300	250
Hotelové izby	stredná	300	250
Kancelárie	stredná	300	250
Učebne	stredná	300	250
Knižnice	vysoká	150	500
Nákupné centrá	vysoká	150	250
Divadlá	vysoká	150	500

Prameň: EN 1991-1-2:2002

Technická norma EN 1991-1-2:2002 v prílohe E neuvádza konkrétny príklad priestoru s veľmi vysokou rýchlosťou rozvoja požiaru, ale uvádza pre tieto prípady, že čas potrebný na dosiahnutie rýchlosti uvoľňovania tepla 1 MW je 75 s. Do kategórie priestorov s veľmi

vysokou rýchlosťou rozvoja požiaru je možné zaradiť napr. sklad penových plastov (napr. napenený polystyrén alebo polyuretánová pena).

6.2.

Vzostupný prúd horúcich plynov a prúdenie pod stropom

Sprievodným javom každého požiaru je vznik splodín horenia. Lokálny požiar je sprevádzaný vzostupným prúdom horúcich plynov, ktorý sa v anglicky písanej odbornej literatúre označuje ako *fire plume*. Vzostupný prúd horúcich plynov sa nad rozvíjajúcim požiarom začína formovať od iniciácie. Za predpokladu, že nie je ovplyvnený okolitými vplyvmi (prúdením vzduchu alebo stavebnými konštrukciami) má tvar prevráteného kužela. Vzostupný prúd horúcich plynov sa delí na tri zóny (zóna plameňa, prechodová zóna a zóna spodín horenia) (Kučera a kol. 2009).

Zóna plameňa je tvorená oblasťou tesne nad povrchom horiaceho materiálu, ktorá je charakteristická približne stálym plameňom a zvyšujúcou sa rýchlosťou prúdenia plynov. Prechodová zóna je oblasť, ktorá spája zónu plameňa so zónou dymu. Táto zóna je charakteristická občasným výskytom plameňa a približne konštantnou rýchlosťou prúdenia plynu. Zóna splodín horenia je poslednou a často najrozsiahlejšou oblasťou vzostupného prúdu horúcich plynov. Je tvorená stĺpcom splodín horenia (plynných, kvapalných aj tuhých) bez plameňa a klesajúcou rýchlosťou prúdenia plynov, teplotu a koncentráciou toxických zložiek a pevných častíc s narastajúcou výškou (Kučera a kol. 2009).

Vzostupný prúd horúcich plynov môže v závislosti od pôsobenia vonkajších vplyvov nadobudnúť nasledovné tvary (Kučera a kol. 2009):

- axiálne symetrický (nie je ovplyvnený stenou ani prúdením vzduchu),
- stenový (je ovplyvnený stenou),
- rohový (je ovplyvnený konštrukciou rohu),
- rozlievajúci sa (napr. cez balkóny),
- vytekajúci (napr. oknom alebo dverami).

Medzi základné parametre vzostupného prúdu horúcich plynov patrí (Kučera a kol. 2009):

- geometria (priemer a výška),
- teplota (priemerná teplota, teplota v osi, teplota v radiálnej vzdialenosti od osi),
- rýchlosť prúdenia plynov, rýchlosť prúdenia plynov v osi, rýchlosť prúdenia plynov v radiálnej vzdialenosti od osi, maximálna rýchlosť prúdenia plynov,
- hmotnostné množstvo vznikajúceho dymu a hmotnostné množstvo prisávaného vzduchu.

Zónu plameňa je možné charakterizovať teplotou a tzv. strednou výškou plameňa. V prípade teploty je možné vypočítať teoretickú (maximálnu) teplotu plameňa postupom uvedeným v podkapitole 2.1.3.1. Pri takto získanej hodnote je však potrebné pamätať na fakt, že sa jedná o maximálne teoreticky dosiahnuteľnú teplotu, ktorá za podmienok reálneho požiaru nebude dosiahnutá (tento predpoklad však nemusí platiť, ak by bol výpočet urobený pre teplotu okolia a do zóny horenia by vstupoval vzduch ohriaty požiarom na podstatne vyššiu teplotu). Komplikovanejším problémom je však rozloženie teploty v plameni. Za predpokladu difúzneho plameňa (reprezentatívny spôsob horenia počas

požiaru) sa dosahuje maximálna teplota na špičke plameňa, pričom smerom k horiacemu materiálu teplota relatívne prudko klesá. Relatívne jednoduchšou problematikou je určenie strednej výšky plameňa, ktorá sa počíta podľa rovnice [6.2], ktorú uvádzajú napr. Karlsson a Quintiere (2000). Pri použití rovnice [6.2] je však potrebné brať do úvahy, že výška plameňa sa mení s časom (plameň pulzuje) a že vypočítaná hodnota predstavuje odhad priemernej hodnoty (počas určitého časového intervalu).

$$L = 0,235 \cdot Q^{\frac{2}{5}} - 1,02 \cdot D \quad (\text{m}) \quad [6.2]$$

L : priemerná výška plameňa (m)

Q : rýchlosť uvoľňovania tepla (kW)

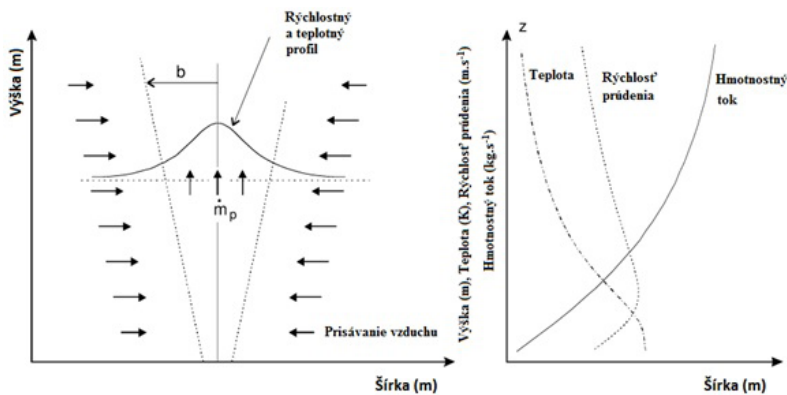
D : priemer požiaru (m)

V prípadoch, keď horenie neprebícha na kruhovej ploche, počíta sa priemer hypotetického kruhu (priemer kruhu, ktorý má rovnakú plochu ako je plocha na ktorej prebieha horenie) podľa rovnice [6.3].

$$D = \sqrt{\frac{A_f \cdot 4}{\pi}} \quad (\text{m}) \quad [6.3]$$

A_f : plocha požiaru (m²)

Geometriu axiálne symetrického vzostupného prúdu horúcich plynov, ako aj zmenu teploty, rýchlosti prúdenia a hmotnosti plynov z ktorých pozostáva znázorňuje obr. 6-2.



Obrázok 6-2 Geometria a vybrané charakteristiky vzostupného prúdu horúcich plynov (Karlsson a Quintiere 2000)

Uhol rozširovania vzostupného prúdu horúcich plynov sa pohybuje od 15 do 30° od osi, pričom štandardne bez hlbšej analýzy sa predpokladá uhol 15°. Polomer vzostupného prúdu horúcich plynov sa počíta podľa rovnice [6.4] a jeho maximálna výška podľa rovnice [6.5] (Karlsson a Quintiere 2000 a Kučera a kol. 2009).

$$b = \frac{6\alpha}{5} \cdot z \quad (\text{m}) \quad [6.4]$$

b : polomer vzostupného prúdu horúcich plynov (m)

α : koeficient prisávania vzduchu do vzostupného prúdu horúcich plynov (0,116) (-)

z : výška nad povrchom horiaceho materiálu (m)

$$z_{fp, \max} = 3,79 \cdot \left[\frac{T_a}{g \cdot (\rho_a \cdot c_p)} \right]^{1/8} \cdot Q_c^{1/4} \cdot \left(\frac{dT_a}{dz} \right)^{-3/8} \quad (\text{m}) \quad [6.5]$$

$z_{fp, \max}$: maximálna výška vzostupného prúdu horúcich plynov (m)

T_a : teplota okolitého vzduchu (K)

g : gravitačné zrýchlenie 9,81 (m.s⁻²)

ρ_a : hustota okolitého vzduchu, pri teplote 20 °C sa uvažuje s hodnotou 1,2 (kg.m⁻³)

c_p : merná tepelná kapacita vzduchu, pri teplote 20 °C sa uvažuje s hodnotou 1,005 (kJ.kg⁻¹.K⁻¹)

Q_c : tepelný tok prenášaný konvekciou (prúdením) – uvažuje sa s hodnotou 70 alebo 80 % z celkového tepla uvoľňovaného požiarom (kW)

dT_a/dz : zmena teploty okolia s výškou priestoru (K.m⁻¹)

Rýchlosť prúdenia vzostupných horúcich plynov klesá so stúpajúcou výškou stĺpca plynov a radiálnou vzdialenosťou od osi. Maximálna rýchlosť prúdenia plynov je v osi a nižších úrovniach vzostupného prúdu. Najnižšia rýchlosť je v okrajových častiach a na najvyšších úrovniach vzostupného prúdu. Rýchlosť prúdenia vzostupného prúdu plynov sa hodnotí z dôvodu posúdenia účinkov na evakuované osoby, zasahujúce hasičské jednotky, stavebné konštrukcie a skladované materiály. Rýchlosť prúdenia vzostupného prúdu horúcich plynov v osi (v závislosti od výšky) sa počíta podľa rovnice [6.6] a profil zmeny rýchlosti v závislosti od radiálnej vzdialenosti od osi podľa rovnice [6.7] (obe rovnice odvodil Heskestad 1995) (Karlsson a Quintiere 2000 a Kučera a kol. 2009).

$$u_{os} = 3,4 \cdot \left(\frac{g}{c_p \cdot \rho_a \cdot T_a} \right)^{1/3} \cdot Q_c^{1/3} \cdot (z - z_0)^{-1/3} \quad (\text{m.s}^{-1}) \quad [6.6]$$

u_{os} : rýchlosť prúdenia vzostupného prúdu horúcich plynov v osi vo výške z (m.s⁻¹)

z : výška nad horiacim materiálom v ktorej sa počíta rýchlosť prúdenia (m)

z_0 : virtuálny začiatok vzostupného prúdu horúcich plynov (m)

$$u_{os,r} = u_{os} \cdot e^{\left[-\left(\frac{r}{1,32 \cdot b_{\Delta T}} \right)^2 \right]} \quad (\text{m.s}^{-1}) \quad [6.7]$$

$u_{os,r}$: rýchlosť prúdenia vzostupného prúdu horúcich plynov vo vzdialenosti r od osi (m.s⁻¹)

r : radiálna vzdialenosť bodu v ktorom sa počíta rýchlosť prúdenia od osi (m)

$b_{\Delta T}$: vzdialenosť od osi po bod v ktorom klesne teplota na 50 % teploty v osi (m)

Vzdialenosť od osi po bod v ktorom klesne teplota na 50 % teploty v osi sa počíta podľa rovnice [6.8], ktorú uvádzajú napr. (Heskestad 1995, Karlsson a Quintiere 2000 a Kučera a kol. 2009).

$$b_{\Delta T} = 0,12 \cdot \left(\frac{T_{os}}{T_a} \right) \cdot (z - z_0) \quad (\text{m}) \quad [6.8]$$

T_{os} : teplota vzostupného prúdu horúcich plynov v osi (K)

Teplota vzostupného prúdu plynov klesá so stúpajúcou výškou stĺpca vzostupných horúcich plynov a radiálnou vzdialenosťou medzi osou a jeho okrajovou časťou. Teplotná analýza vzostupného prúdu horúcich plynov sa vykonáva najmä za účelom návrhu zariadení na odvod tepla a splodín horenia, posúdenia účinku teploty na evakuované osoby, stavebné konštrukcie, uložené materiály a hasičské jednotky. Nárast teploty horúceho prúdu vzostupných plynov sa počíta podľa rovnice [6.9] a nárast teploty vo vzdialenosti r sa počíta podľa rovnice [6.10]. Uvedené rovnice odvodil Heskestad (1995) (Kučera a kol. 2009).

$$\Delta T_{os} = 9,1 \cdot \left(\frac{T_a}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_a^2} \right)^{1/3} \cdot Q_c^{2/3} \cdot (z - z_0)^{-5/3} \quad (\text{K}) \quad [6.9]$$

ΔT_{os} : Nárast teploty v osi vzostupného prúdu horúcich plynov oproti teplote okolia (K)

$$\Delta T_{os,r} = \Delta T_{os} \cdot e^{\left[-\left(\frac{r}{1,32 \cdot b_{\Delta T}} \right)^2 \right]} \quad (\text{K}) \quad [6.10]$$

$\Delta T_{os,r}$: nárast teploty oproti teplote okolia v bode vzdialenom od osi o vzdialenosť r (m)

Jedným z najdôležitejších parametrov lokálneho požiaru je hmotnosť a objem vzniknutých splodín horenia (buď celkový alebo za určitý čas). Hmotnosť vzostupného prúdu horúcich plynov pozostáva z hmotnosti splodín horenia a hmotnosti prisávaného vzduchu. Hmotnosť splodín horenia uvoľňovaných horením je podstatne menšia, ako hmotnosť prisávaného vzduchu. Pri praktických výpočtoch sa hmotnosť splodín horenia uvoľnených počas horenia zanedbáva a za hmotnosť vzostupného prúdu horúcich plynov sa považuje hmotnosť prisávaného vzduchu (Kučera a kol. 2009).

Hmotnostný tok vzostupného prúdu horúcich plynov sa počíta podľa rovníc [6.11 a 6.12], ktoré odvodil Heskestad (1995). Rovnica [6.11] platí pre výpočet hmotnostného toku vo výške nad horiacim materiálom, ktorá je vyššia ako priemerná výška plameňa podľa rovnice [6.2]. V prípadoch, keď je potrebné vypočítať hmotnostný tok vzostupného prúdu horúcich plynov vo výške rovnjej alebo nižšej ako priemerná výška plameňa, použije sa rovnica [6.12].

$$m_e = 0,071 \cdot Q_c^{1/3} \cdot (z - z_0) + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot Q_c \quad (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \quad [6.11]$$

m_e : hmotnostný tok vzostupného prúdu horúcich plynov ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$m_e = 0,0056 \cdot Q_c \cdot \frac{z}{L} \quad (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \quad [6.12]$$

Na záver časti venovanej vzostupnému prúdu horúcich plynov je potrebné ešte vysvetliť termín virtuálny začiatok vzostupného prúdu. Potreba virtuálneho začiatku je daná historickým vývojom, kedy experimentálny výskum bol realizovaný predovšetkým s bodovými zdrojmi s nízkymi tepelnými výkonmi. Následkom nedostatku iných údajov, sa tieto poznatky zovšeobecňovali pre ostatné geometrie požiarov (kruhov, pravouhlé alebo líniové) a vyššie tepelné výkony. Virtuálny začiatok slúži na transformáciu rovníc odvodených z experimentov realizovaných na bodových zdrojoch na podmienky reálnych požiarov. Pre požiare s nízkou rýchlosťou uvoľňovania tepla a veľkou plochou má virtuálny počiatok záporné hodnoty a naopak pre požiare s vysokou rýchlosťou uvoľňovania tepla

a malou plochou nadobúda kladné hodnoty (Kučera a kol. 2009). Virtuálny začiatok sa počíta podľa rovnice [6.13], ktorú odvodil Heskestad (1995).

$$z_0 = -1,02 \cdot D + 0,083 \cdot Q_c^{2/5} \quad [6.13]$$

Pri dostatočnom rozdielne teplôt stúpa vzostupný prúd horúcich plynov až k stropu. Keď dosiahne stĺpec stúpajúcich plynov stropnú konštrukciu nastane jeho odklon od osi, čím sa vytvorí charakteristický relatívne rýchly pohyb plynných splodín horenia, ktorý sa nazýva prúdenie pod stropom (v anglicky písanej literatúre sa tento termín nazýva Ceiling Jet Flow). Splodiny horenia sa začnú v relatívne tenkej vrstve pod stropom rozvíjať a následne postupne šíriť k ohraničujúcim konštrukciám (stenám). Pri strete s ohraničujúcimi konštrukciami nastáva zmena smeru prúdenia splodín horenia k podlahe. Zmenou smeru sa splodiny horenia pohybujú do vrstvy s nižšou teplotou a teda aj vyššou hustotou. Prúdenie smerom k podlahe sa pôsobením vzlaku a trecích síl spomaľuje, až nakoniec ustane a smer prúdenia sa opäť zmení ku stopu (Kučera a kol. 2009).

Podnetom pre skúmanie prúdenia pod stropom v iniciačnej fáze rozvoja požiaru bola snaha získať údaje o odozve požiarnej hlásičov a sprinklerových hlavíc stabilných hasiacich zariadení umiestnených tesne pod stropom. Za účelom stanovenia optimálnej odozvy týchto požiarotechnických zariadení sa počíta predovšetkým maximálna teplota prúdenia, maximálna rýchlosť prúdenia, charakteristická šírka prúdenia (teplotný alebo rýchlostný profil) a hustota tepelného toku prenášaného do stropu konvekciou (Kučera a kol. 2009).

Maximálna teplota v mieste prúdenia sa počíta podľa rovníc [6.14 a 6.15], pričom rovnica [6.14] sa používa v prípadoch keď radiálna vzdialenosť od osi vzostupného prúdu horúcich plynov je menšia alebo rovná 18 % z celkovej výšky stropu nad zdrojom požiaru zmenšenej o výšku virtuálneho začiatku vzostupného prúdu plynov a rovnica [6.15] v ostatných prípadoch. Maximálna rýchlosť prúdenia sa počíta podľa rovníc [6.16 a 6.17]. Rovnica [6.16] sa používa v prípadoch keď radiálna vzdialenosť od osi vzostupného prúdu horúcich plynov je menšia alebo rovná 15 % z výšky stropu nad zdrojom požiaru zmenšenej o výšku virtuálneho začiatku vzostupného prúdu plynov a rovnica [6.17] v ostatných prípadoch. Rovnice [6.14 až 6.17] odvodil Alpert (1972, 1987 a 2002) (Kučera a kol. 2009).

$$T_{\max} = 21,4 \cdot \frac{Q_c^{2/3}}{(H-z_0)^{5/3}} + T_a \quad (\text{K}) \quad [6.14]$$

T_{\max} : maximálna teplota prúdenia pod stropom (K)

H: výška stropu nad zdrojom požiaru

$$T_{\max} = 6,82 \cdot \frac{Q_c^{2/3} / (H-z_0)^{5/3}}{(r/H-z_0)^{2/3}} + T_a \quad (\text{K}) \quad [6.15]$$

r: radiálna vzdialenosť od osi fire plume (m)

$$v_{\max} = 1,08 \cdot \left(\frac{Q_c}{H-z_0} \right)^{1/3} \quad (\text{m.s}^{-1}) \quad [6.16]$$

v_{\max} : maximálna rýchlosť prúdenia pod stropom (K)

$$v_{\max} = 0,22 \cdot \frac{(Q_c/H-z_0)^{1/3}}{(r/H-z_0)^{5/6}} \quad (\text{m.s}^{-1}) \quad [6.17]$$

Ďalším významným parametrom prúdenia pod stropom je charakteristická šírka. Tento parameter je významný najmä pre potreby zistenia času reakcie vybraných požiarotechnických zariadení vo fáze lokálneho rozvoja požiaru. Charakteristická šírka prúdenia pod stropom sa vzťahuje buď k teplotnému profilu alebo k rýchlostnému profilu. Pri teplotnom profile je charakteristická šírka prúdenia definovaná ako vzdialenosť od povrchu stropnej konštrukcie k miestu v ktorom stredná teplota prúdenia pod stopom poklesne o hodnotu $1/e$ (t.j. $1/2,718 = 0,368$) maximálnej teploty v mieste radiálnej vzdialenosti r od osi vzostupného prúdu horúcich plynov. Šírka tejto vrstvy dosahuje spravidla 10 až 12% výšky miestnosti, nesmie však prekročiť hodnotu 25%. Základnú rovnicu [6.18] pre výpočet charakteristickej výšky prúdenia pod stropom podľa teplotného profilu odvodi Motevalli a Marks (1991). Charakteristická šírka vrstvy prúdenia pod stropom podľa rýchlostného profilu sa počíta podľa rovnice [6.19] (Kučera a kol. 2009).

$$l_T = 0,112 \cdot \left[1 - \exp\left(-2,24 \cdot \frac{r}{H-z_0}\right) \right] \cdot (H - z_0) \quad (\text{m}) \quad [6.18]$$

l_T : charakteristická šírky vrstvy prúdenia pod stropom podľa teplotného profilu (m)

$$l_V = 0,205 \cdot \left[1 - \exp\left(-1,75 \cdot \frac{r}{H-z_0}\right) \right] \cdot (H - z_0), \text{ platí pre } 0,26 \leq r/(H - z_0) < 0,75 \quad (\text{m}) \quad [6.19]$$

l_V : charakteristická šírky vrstvy prúdenia pod stropom podľa rýchlostného profilu (m)

Ďalším významným parametrom prúdenia pod stropom je tepelný tok z horúcich plynov do stropu (prenos tepla prúdením). V počiatkovej fáze rozvoja požiaru má rozhodujúci podiel na prenose tepla tepelná konvekcia (tepelné prúdenie), ktorá ovplyvňuje nie len aktiváciu požiarotechnických zariadení, ale môže zapríčiniť aj poškodenie predmetov inštalovaných pod stropom (napr. káblové alebo potrubné rozvody). Maximálna hustota tepelného toku z horúceho prúdu plynov do stropu sa dosahuje v začiatkovej fáze rozvoja požiaru, kedy sa teplota konštrukcie ešte blíži k teplote okolia (Kučera a kol. 2009).

Dôvodom prečo sa maximálna hustota tepelného toku prenášaného tepelnou konvekciou dosahuje v počiatkovej fáze rozvoja požiaru je skutočnosť, že hustota tepelného toku prenášaného konvekciou závisí od rozdielu teplôt, pričom vo fáze rozvoja požiaru sa teplota stropu blíži k hodnote 20°C (rozdiel teplôt medzi vzostupným prúdom horúcich plynov a teplotou stropu je teda maximálny). Uvedená tepelná konvekcia zanecháva vo fáze lokálneho požiaru cenné stopy, na základe ktorých je možné s pomerne vysokou pravdepodobnosťou identifikovať miesto vzniku požiaru. Vo fáze plne rozvinutého požiaru je dominantným spôsobom prenosu tepla tepelná radiácia.

Rovnice [6.20 a 6.21] pre výpočet hustoty tepelného toku prenášaného konvekciou do stropu odvodi Yu a Feath (1979) a bližšie popisujú napr. Alpert (2002) a Kučera a kol. (2009).

$$q_c = 38,6 \cdot \frac{Q_c}{(H-z_0)^2 \cdot Ra^{1/6}}, \text{ platí pre } \frac{r}{H-z_0} \leq 0,2 \quad (\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}) \quad [6.20]$$

$$q_c = 4,8 \cdot \frac{Q_c}{(H-z_0)^2 \cdot Ra^{1/6}} \cdot \left(\frac{r}{H-z_0}\right)^{-1,3}, \text{ platí pre } 0,2 < \frac{r}{H-z_0} < 2,0 \quad (\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}) \quad [6.21]$$

q_c : hustota tepelného toku prenášaného konvekciou z horúcich plynov do stropu ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$)
 Ra : Rayleighovo číslo (-)

Rayleighovo číslo sa počíta podľa rovnice [6.22] (Alpert 2002 a Kučera a kol. 2009).

$$Ra = \frac{g \cdot Q_c \cdot (H - z_0)^2}{3,5 \cdot p \cdot v^3} \quad (-) \quad [6.22]$$

p : atmosférický tlak vzduchu (kPa)

v : kinematická viskozita ($m^2 \cdot s^{-1}$)

Posledným dôležitým parametrom prúdenia horúcich plynov pod stropom je vodorovná vzdialenosť, na ktorú sa rozšíri plameň pod stropom. V začiatkovej fáze rozvoja požiaru je výška plameňa obvyčajne nižšia ako výška stropu a plameň teda nezasahuje strop. Ak počas rozvoja lokálneho požiaru sa zvýši výška plameňa natoľko, že tento dosiahne výšku stropu, počíta sa vodorovná vzdialenosť na ktorú sa rozšíri plameň pod stropom podľa rovnice [6.23], ktorú odvodili Heskestad a Hamada (1993) a ktorú bližšie popisujú Kučera a kol. (2009).

$$L_h = 0,95 \cdot (L - H) \quad (m) \quad [6.23]$$

L_h : vodorovná vzdialenosť, na ktorú sa rozšíri plameň pod stropom (m)

Okrem prúdenia pod stropom je z hľadiska posúdenia dopadu lokálneho požiaru na osoby dôležitý údaj o výške dymovej vrstvy, jej teplote a koncentrácii hlavných toxických splodín horenia v nej. V prípade lokálneho požiaru v priestore bez odvodu splodín horenia (uzatvorený priestor) sa výška dymovej vrstvy počíta podľa rovnice [6.24], jej teplota podľa rovnice [6.25] a koncentrácia zložky splodín horenia podľa rovnice [6.26] (Kučera a kol. 2009).

$$z_v = \left(\frac{0,076}{\rho_g} \cdot \frac{(1 - \chi_r)^{1/3} \cdot \alpha^{1/3}}{A} \cdot \frac{2}{n+3} \cdot t^{(1 + \frac{n}{3})} + \frac{1}{H^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (m) \quad [6.24]$$

z_v : výška rozhrania hornej horúcej a dolnej chladnej vrstvy – meraná od stropu (m)

χ_r : podiel tepla prenášaný vo fáze lokálneho požiaru radiáciou (zvyčajne sa uvažuje s hodnotou 0,3) (-)

α : koeficient rýchlosti rozvoja požiaru (hodnoty sú uvedené v tabuľke 6-2) ($kW \cdot s^{-1}$)

ρ_g : hustota vrstvy dymu ($kg \cdot m^{-3}$)

A : plocha priestoru (m^2)

n : mocninový parameter (zvyčajne sa uvažuje s hodnotou 2) (-)

t : čas (s)

H : výška priestoru (m)

$$T_g = T_a + \frac{(1 - \beta)}{c_p \cdot \rho_g \cdot A \cdot (H - z_v)} \cdot \frac{\alpha \cdot t^{n+1}}{n+1} \quad (K) \quad [6.25]$$

T_g : teplota hornej horúcej vrstvy plynov (K)

β : zlomok odvedeného tepla do ohraničujúcich konštrukcií (zvyčajne sa zanedbáva) (-)

$$Y_g = Y_a + \frac{y_i}{c_p \cdot \rho_g \cdot A \cdot (H - z_v)} \cdot \frac{\alpha \cdot t^{n+1}}{n+1} \quad (kg \cdot kg^{-1}) \quad [6.26]$$

Y_g : koncentrácia zložky i splodín horenia v hornej horúcej vrstve ($kg \cdot kg^{-1}$)

Y_a : počiatková koncentrácia zložky i splodín horenia vo vzduchu ($kg \cdot kg^{-1}$)

y_i : výťažok zložky i splodín horenia prepočítaný na jednotku uvoľneného tepla ($kg \cdot kJ^{-1}$)

Tabuľka 6-2 Koefficienty rýchlosti rozvoja požiaru pre rôzne rýchlosti rozvoja požiaru

Rýchlosť rozvoja požiaru (-)	Koeficient rýchlosti rozvoja požiaru (-)
Pomalá	0,003
Stredná	0,012
Rýchla	0,047
Veľmi rýchla	0,19

Prameň: EN 1991-1-2:2002

6.3. Kritická rýchlosť uvoľňovania tepla pre etapu flashover

Flashover je najmenej preskúmanou fázou rozvoja požiaru. Táto fáza rozvoja požiaru nastane len v prípadoch, ak rýchlosť uvoľňovania tepla z požiaru dosiahne kritickú hodnotu, ktorá závisí od možnosti odvodu tepla z priestoru (požiarneho úseku). Ako už bolo uvedené v predchádzajúcich častiach, dominantným mechanizmom prenosu tepla vo fáze rozvoja požiaru (fáza pre-flashover) je tepelná konvekcia. Preto všetky metódy výpočtu kritickej rýchlosti uvoľňovania tepla pre vznik javu flashover sú založené na zohľadnení možnosti odvodu tepla z požiarneho úseku minimálne tepelnou konvekciou (únik horúcich spodín horenia z požiarneho úseku). Sofistikovanejšie metódy však zohľadňujú aj možnosť odvodu tepla z horúcich spodín horenia do ohraničujúcich konštrukcií. Posúdenie možnosti vzniku javu flashover, ako aj predbežný odhad času v ktorom nastane je potom založený na porovnaní kritickej rýchlosti uvoľňovania tepla s rýchlosťou uvoľňovania tepla z požiaru. Rýchlosť uvoľňovania tepla z požiaru vo fáze jeho rozvoja (lokálny požiar) môže byť odhadnutá z rovnice [6.1] a rýchlosť uvoľňovania tepla vo fáze plne rozvinutého požiaru je možné odhadnúť ako súčin maximálnej rýchlosti uvoľňovania tepla pre daný priestor (pre vybrané priestory sú tieto hodnoty uvedené v tabuľke 6-1) a podlahovej plochy tohto priestoru. Dôležitý poznatok pre posúdenie fázy flashover uvádzajú aj Oswald a kol. (2009), podľa ktorých ak sa v požiarom úseku nachádzajú len materiály triedy reakcie na oheň A1, A2 a/alebo B, etapa flashover nenastane. Kritická rýchlosť uvoľňovania tepla pre vznik javu flashover sa počíta z rovnice [6.27] a nadväzujúcich rovníc [6.28 až 6.30], ktoré odvodili McCaffrey a kol. (1981) a podrobne popisujú napr. Walton a Thomas (2002) a Kučera a kol. (2009).

$$Q_{\text{crit}} = 610 \sqrt{\lambda_k \cdot A_T \cdot A_0 \cdot \sqrt{H_0}} \quad (\text{kW}) \quad [6.27]$$

Q_{crit} : kritická rýchlosť uvoľňovania tepla pre vznik javu flashover (kW)

λ_k : koeficient efektívneho prestupu tepla ohraničujúcich konštrukcií (kW.m⁻².K⁻¹)

A_T : celková plocha ohraničujúcich konštrukcií (plocha podlahy, stien a stropu bez plochy okien a dverí) (m²)

A_0 : plocha otvorených otvorov (m²)

H_0 : výška otvorených otvorov (m)

Pred výpočtom samotného koeficienta efektívneho prestupu tepla je potrebné vypočítať čas tepelnej penetrácie konštrukcie podľa rovnice [6.28]. Čas tepelnej penetrácie je čas potrebný na dosiahnutie ustálenej teploty v konštrukcii po zmene teploty v interiéri alebo exteriéri. Pre potreby požiarneho inžinierstva a zisťovania príčin vzniku požiarov sa uvažuje s nárastom teploty v interiéri následkom požiaru. Z uvedeného vyplýva, že koeficient efektívneho prestupu tepla sa počíta pre konkrétny čas.

$$t_p = \left(\frac{\rho \cdot c}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 \quad (\text{s}) \quad [6.28]$$

t_p : čas tepelnej penetrácie konštrukcie (s)

ρ : hustota materiálu ohraničujúcej konštrukcie ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

c : špecifická tepelná kapacita materiálu ohraničujúcej konštrukcie ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

λ : koeficient tepelnej vodivosti materiálu ohraničujúcej konštrukcie ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

δ : hrúbka materiálu ohraničujúcej konštrukcie (m)

$$\lambda_k = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \rho \cdot c}{t}}, \text{ platí pre } t < t_p \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}) \quad [6.29]$$

$$\lambda_k = \frac{\lambda}{\delta}, \text{ platí pre } t \geq t_p \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}) \quad [6.30]$$

6.4.

Priemerná teplota plynov v požiarom úseku

Priemerná teplota plynov má rozdielny spôsob stanovenia pre fázu pre-flashover a fázu post-flashover. Rozdielny je aj účel ich využitia. Priemerná teplota plynov v požiarom úseku vo fáze pre-flashover sa stanovuje predovšetkým pre účely posúdenia bezpečnosti unikajúcich osôb, zatiaľ čo teplota vo fáze post-flashover je dôležitá pre výpočet požiarnej odolnosti stavebných konštrukcií. Priemerná teplota plynov v požiarom úseku vo fáze pre-flashover sa počíta podľa rovnice [6.31], ktorú odvodili McCaffrey a kol. (1981) a upravili Mowrer a Williamsson (1987) (Kučera a kol. 2009).

$$\Delta T_g = f \cdot 6,85 \cdot \left(\frac{Q^2}{A_0 \cdot \sqrt{H} \cdot \lambda_k \cdot A_T}\right)^{1/3} \quad (\text{K}) \quad [6.31]$$

ΔT_g : priemerný nárast teploty plynov v požiarom úseku (K)

f : koeficient vyjadrujúci mesto vzniku požiaru, požiar v strede miestnosti $f=1$, požiar pri stene $f=1,3$ a požiar v rohu miestnosti $f=1,7$ (-)

Na výpočet priemernej teploty plynov v požiarom úseku vo fáze post-flashover bolo vypracovaných pomerne veľké množstvo metód. S ohľadom na obmedzený rozsah publikácie bude na tomto mieste bližšie popísaná len metóda podľa Lawa (1983), ktorá je relatívne jednoduchá a zároveň vykazuje pomerne dobrú zhodu s výsledkami experimentov. Priemerný nárast teploty plynov v požiarom úseku vo fáze post-flashover sa počíta podľa rovnice [6.32], pre výpočet vstupných údajov do citovanej rovnice sa používajú rovnice [6.33 až 6.35], ktoré uvádza napr. Law (1983) a Walton a Thomas (2002).

$$\Delta T_g = T_{g(\max)} \cdot (1 - e^{-0,05 \cdot \psi}) \quad (\text{K}) \quad [6.32]$$

$T_{g(\max)}$: maximálna teplota, ktorá môže byť v požiarom úseku pri odvetraní vyjadrenom parametrom Ω dosiahnutá (K)

Ψ : parameter vyjadrujúci požiarne zaťaženie a odvetranie požiarneho úseku ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

Maximálna teplota, ktoré môže byť v požiarom úseku pri odvetraní vyjadrenom parametrom Ω dosiahnutá sa počíta podľa rovnice [6.33]. Parameter odvetrania Ω sa počíta podľa rovnice [6.34].

$$T_{g(\max)} = 6000 \cdot \frac{(1 - e^{-0,1 \cdot \Omega})}{\sqrt{\Omega}} \quad (\text{K}) \quad [6.33]$$

Ω : parameter odvetrania požiaru (-)

$$\Omega = \frac{(A_T - A_0)}{A_0 \cdot \sqrt{H_0}} \quad (-) \quad [6.34]$$

Parameter vyjadrujúci požiarne zaťaženie a odvetranie požiarneho úseku sa počíta podľa rovnice [6.35]. Do citovanej rovnice sa za požiarne zaťaženie dosadzuje požiarne zaťaženie celej plochy požiarneho úseku (nie požiarne zaťaženie prepočítané na jednotku plochy požiarneho úseku) prepočítané na hmotnosť dreva, ktorého zhorením sa uvoľní rovnaké množstvo tepla, ako zhorením všetkých horľavých látok v požiarom úseku.

$$\Psi = \frac{M_i}{[A_0 \cdot (A_T - A_0)]^{1/2}} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}) \quad [6.35]$$

Ψ : parameter vyjadrujúci požiarne zaťaženie a odvetranie požiarneho úseku (-)

M_i : požiarne zaťaženie požiarneho úseku vyjadrené ekvivalentným množstvom dreva

Podľa Kučeru a kol. (2009) môže byť z dôvodu bezpečnosti výsledok získaný výpočtom podľa popisovanej metódy navýšený o 25 %.

Okrem uvedenej metódy sa priemerná teplota plynov vo vnútri požiarneho úseku v praxi odhaduje aj na základe nominálnych alebo parametrických kriviek. Výpočet teploty v požiarom úseku na základe nominálnych teplotných kriviek (napr. normová teplotná krivka) je síce veľmi jednoduchý, jedná sa však až o príliš konzervatívny odhad, nakoľko tento výpočet nezohľadňuje požiarne zaťaženie požiarneho úseku, jeho odvetranie ani činnosť požiarotechnických zariadení (predovšetkým stabilného hasiaceho zariadenia a zariadenia na odvod tepla a splodín horenia). Nominálne teplotné krivky nachádzajú uplatnenie predovšetkým pri meraní alebo výpočtoch požiarnej odolnosti stavebných konštrukcií. Pri použití nominálnych teplotných kriviek na výpočet teploty plynov v požiarom úseku je však takto vypočítané hodnoty potrebné považovať len za hrubý odhad. Podstate presnejšie hodnoty je možné získať použitím parametrických kriviek, ktoré stanovujú výslednú teplotu na základe požiarneho zaťaženia a odvetrania požiarneho úseku, ako aj činnosti požiarotechnických zariadení. Pre výpočet teploty v požiarom úseku pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov je popísaná metodika vhodnejšia, ako nominálne a parametrické teplotné krivky.

7 Riadenie dymu

Charakteristickým znakom požiarov je uvoľňovanie veľkého množstva tepla a dymu.

Riadenie dymu (smoke management) je dôležitou súčasťou protipožiarnej bezpečnosti. Táto oblasť v sebe zahŕňa metódy zamerané na znižovanie množstva, rýchlosti vzniku a toxických účinkov dymu. Využíva sa v prípade vnútorných aj vonkajších požiarov.

V prípade vnútorných požiarov sa jedná o metódy implementované do pasívnej alebo aktívnej kontroly pohybu dymu. Dosahuje sa nimi udržanie normálneho tlaku, prietoku vzduchu a vzlaku. Ich hlavným cieľom je zvýšenie bezpečnosti užívateľov, hasičov a záchranárov ako aj majetku. V prípade vonkajších požiarov sa využívajú možnosti oddelenia a zriedenia vzniknutého dymu. Dosahuje sa tým minimalizácia množstva dymu a jeho toxických účinkov najmä na kritické oblasti (vysoká hustota osídlenia, cesty, nemocnice). Nevyhnutným predpokladom je poznanie mechanizmu vzniku dymu a jeho chemických a fyzikálnych charakteristík.

7.1. Charakteristiky dymu pri vnútorných a vonkajších požiaroch

Teploto vznikajúce pri požiari ohrieva plyny, zintenzívňuje vyparovanie kvapalín a spôsobuje termickú degradáciu pevných látok. Plyny, pary kvapalín a plynné produkty termickej degradácie sa miešajú so vzduchom a horia. Horením dochádza k vzniku nových látok v plynnom (napr. CO_2) ale aj pevnom skupenstve (sadze). Tieto produkty horenia (spaliny, splodiny) sa miešajú so vzduchom a vytvárajú dym. Dym vznikajúci pri vnútorných a vonkajších požiaroch možno charakterizovať chemickými (zloženie, toxicita) a fyzikálnymi (farba, hustota, vôňa, optická hustota) vlastnosťami.

7.1.1.

Vznik, pohyb, teplota, hustota a množstvo vzniknutého dymu

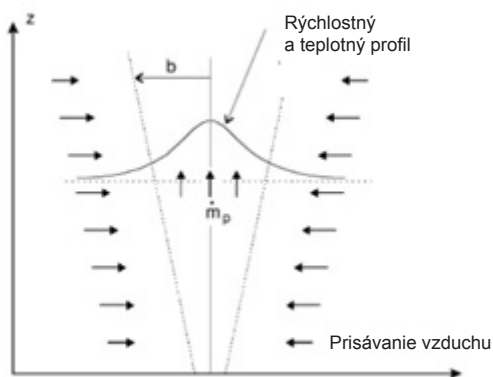
Dym je disperzná zmes plynných splodín požiaru, nezhořených pevných častíc s rozmermi $10^{-7} - 10^{-9}$ m (obr. 7-1), skondenzovaných látok a veľkého množstva vzduchu. Dym obsahuje aj pary kvapalín. Ak je teplota dymu vyššia ako teplota kondenzácie pár,

pary sa chovajú ako plyny. Ak je teplota dymu nižšia ako teplota kondenzácie pár, pary sa menia na kvapky kvapaliny.



Obrázok 7-1 Rozmery častíc dymu (Drysdale 1999)

Pri požiari sa vznikajúce spaliny pohybujú smerom nahor vo vzostupnom prúde spalín. Vplyvom tepla dochádza k expanzii. Na okrajoch vzostupného prúdu, kde sa prejavujú turbulencie, je prisávaný okolitý vzduch a stĺpec dymu nadobúda tvar obráteného kužeľa (obr. 7-2). Dôsledkom prisávania vzduchu nastáva zväčšenie celkového objemu stĺpca, jeho ochladzovanie (preto je najvyššia teplota v osovom strede) a znižovanie koncentrácie sploďín horenia.



Obrázok 7-2 Prisávanie vzduchu do stĺpa dymu (Karlsson a Quintiere 2000)

7.1.2.

Vplyv chémie paliva, fyzikálnych vlastností a množstva oxidačného prostriedku na chemické a fyzikálne charakteristiky dymu

Na chemické charakteristiky dymu (sploďiny horenia) vplýva chemické zloženie a termická stabilita horľavých látok a množstvo a dostupnosť oxidačného prostriedku (dokonalé a nedokonalé horenie). Pri horení organických látok sa v dyme nachádzajú:

N_2 , CO_2 , CO , SO_2 , NO_x , fosgén, HF, HCl, H_2S , H_2O , C a iné, často toxické látky. Na horenie sa spotrebúva kyslík z horľaviny ale hlavne zo vzduchu, preto dochádza k zníženiu jeho obsahu.

Dôležitou fyzikálnou vlastnosťou dymu je optická hustota. Je to miera zoslabenia svetelného lúča prechádzajúceho cez dym vyjadrená ako logaritmus neprievitnosti dymu.

$$D_e = -\ln \frac{I}{I_0} \quad (-) \quad [7.1]$$

$$D_L = -\frac{1}{L} \ln \frac{I}{I_0} \quad (m^{-1}) \quad [7.2]$$

Kde I_0 je pôvodná intenzita svetelného lúča a I je intenzita po prechode vrstvou dymu s hrúbkou L .

Zápach a farba dymu sú spôsobené produktmi dokonalého a nedokonalého horenia prítomných horľavých látok. Pri horení textílií, srsti, kože, vlasov sa objavuje nepríjemný zápach pyridínu, akroleínu, chinolínu, sírnych a dusíkatých zlúčenín. Pri horení kaučuku a gummy je dominantný ostrý zápach sírnych zlúčenín. Ostrý zápach akroleínu, dráždiaci sliznice je charakteristický pre horenie tukov a olejov. Špecifický zápach uhľovodíkov sa prejavuje pri požiaroch ropných produktov, vznikajúci dym je čierny v dôsledku veľkého množstva sadzí. Farba dymu z dreva je šedočierna, zo sena, slamy a papiera žltobiela a dym z textílií je hnedý.

7.1.3.

Zmena vlastností dymu

Vlastnosti dymu nie sú stále, menia sa. Tieto zmeny môžeme označiť ako starnutie dymu. Pevné častice dymu, vzhľadom na ich rozmery, nie sú ovplyvňované gravitáciou, prejavuje sa Brownov pohyb, častice sú krátko po vzniku dymu rozptýlené a vznášajú sa. Po čase nastáva koagulácia častíc do väčších zhlukov (obr. 7-3), začína prevládať pôsobenie gravitácie, dym sa začína usadzovať. Dym klesajúci k podlahe opticky mizne, ale toxické splodiny požiaru zostávajú v prostredí.



Obrázok 7-3 Proces koagulácie častíc dymu (Drysdale 1999)

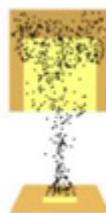
7.1.4.

Pohyb dymu – prúdenie plynov pri požiaroch

Pri vnútorných požiaroch sploďiny horenia majú väčší objem než horľavá látka a preto dochádza k nárastu tlaku. Teplo vznikajúce pri horení spôsobuje zvyšovanie teploty, preto sa zvyšuje objem vzduchu aj sploďín horenia a dochádza k ďalšiemu nárastu tlaku. Dôsledkom nárastu tlaku je výmena plynov medzi priestorom horenia a okolím. Na pohyb a výmenu plynov majú vplyv faktory prostredia aj klimatické podmienky. Ak požiar nie je ovplyvnený stavebnými konštrukciami (strop) a poveternostnými vplyvmi (vietor) nastáva vzostupné šírenie dymu (obr. 7-4).



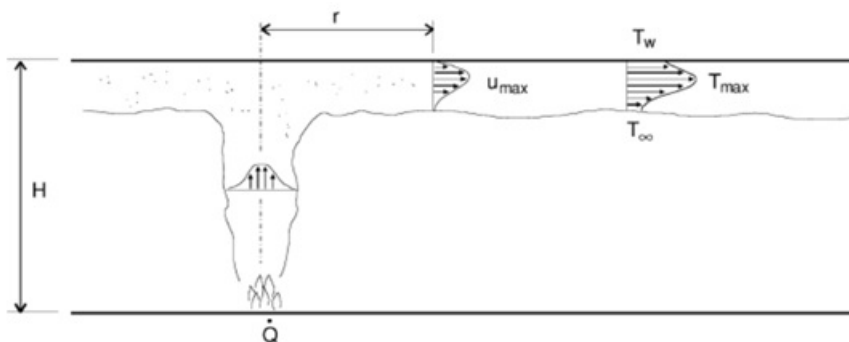
Volný priestor



Uzatvorená horná polovica priestoru

Obrázok 7-4 Vplyv konštrukcie na pohyb dymu (CFD)

Ak požiar prebieha v uzavretom priestore, ovplyvňujú pohyb a charakteristiky dymu stropné konštrukcie. Dym najskôr stúpa vzostupne a po dosiahnutí stropu sa šíri k stenám. Dym prúdiaci pod stropom má maximálnu teplotu aj rýchlosť prúdenia bližšie k stropu (obr. 7-5).



Obrázok 7-5 Charakteristiky dymu pri podstropnom prúdení (Karlsson a Quintiere 2000)

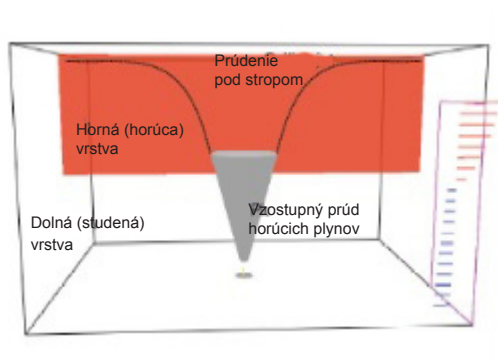
7.1.5.

Zóny zadymenia pri vnútorných požiaroch

Pri vnútorných požiaroch sa používa všeobecné delenie dymu na zónu horúceho dymu a zónu studeného dymu. Horúci dym v dôsledku nižšej hustoty stúpa ku stropu. Pod zónou horúceho dymu sa nachádza čistý alebo menej znečistený vzduch je v spodnej

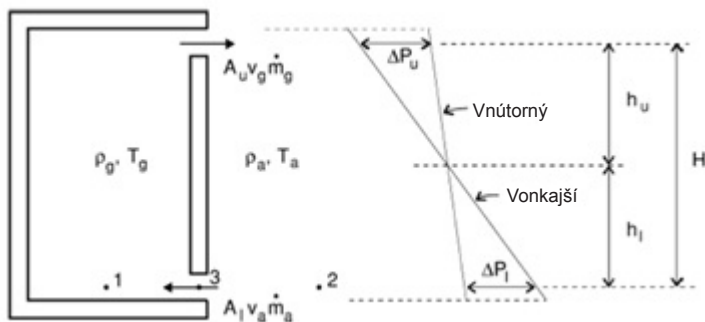
časti miestnosti. Je to typické pre miestnosť s ohniskom požiaru alebo príslušné priestory spojené s miestnosťou s ohniskom požiaru dverami. Zóna studeného dymu sa nachádza v priestoroch, kde sa vplyvom prenosu tepla dym ochladil na teplotu studeného vzduchu a má s ním porovnateľnú hustotu.

Pre pohyb a vlastnosti dymu v horúcej zóne je charakteristické, že od ohniska stúpa v rozširujúcom sa stĺpci k stropu. Po dosiahnutí stropu sa začína šíriť horizontálne, po dosiahnutí bočných stien sa začína rozširovať smerom nadol. Hrúbka vrstvy dymu sa zväčšuje s rastúcim množstvom vzniknutého dymu. V hornej časti miestnosti vzniká pretlak (hodnota klesá so zvyšovaním vzdialenosti od stropu) a v dolnej časti podtlak (hodnota klesá so zvyšovaním vzdialenosti od podlahy) (obr. 7-6). V mieste, kde dochádza k vyrovnaniu tlakových rozdielov – vznik neutrálnej roviny, jej tlak zodpovedá vonkajšiemu tlaku. Ak je miestnosť uzavretá, neutrálna rovina bude klesať až na podlahu, miestnosť sa zaplní dymom a horenie sa zastaví v dôsledku nedostatku kyslíka.



Obrázok 7-6 Vytvorenie vrstvy horúceho dymu a vznik tlakových rozdielov pri vnútornom požiari (Drysdale 1999)

Ak má miestnosť jeden alebo viac otvorov, bude prebiehať výmena plynov s okolím a neutrálna rovina sa ustáli do takej výšky, ktorá zodpovedá rovnováhe hmotnostného toku odvádzaného dymu z miestnosti a privádzaného vzduchu z okolia (obr. 7-7).

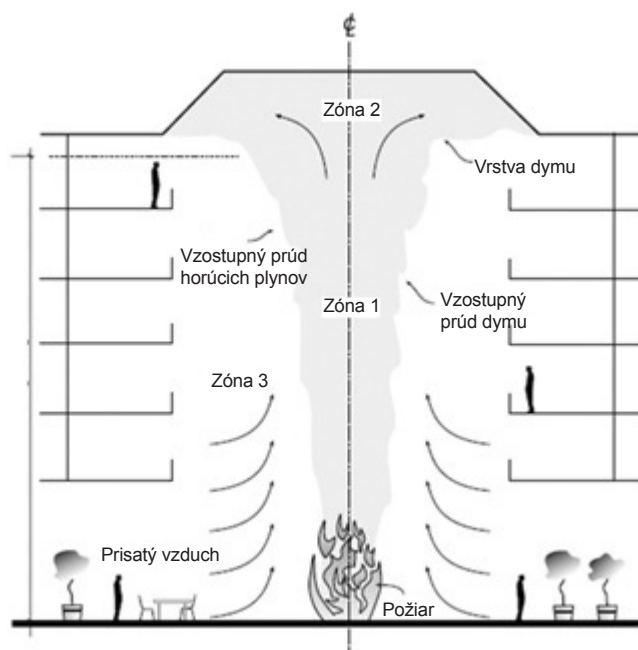


Obrázok 7-7 Vytvorenie neutrálnej roviny (Karlsson a Quintiere 2000)

Pri teoretickom stanovení polohy neutrálnej roviny pri výmene plynov cez otvory v rôznej výške sa vychádza zo zjednodušenia, že v celom priestore je rovnaká teplota, rýchlosť prúdenia v miestnosti sa blíži k nule a hustota dymu (zmesi spodín horenia so vzduchom) je za normálnych podmienok rovná hustote vzduchu.

Pre pohyb dymu v studenej zóne platí, že vznikajúci dym je ochladzovaný v dôsledku styku s okolitým studeným vzduchom, ohrevom konštrukcií a sálaním. Ak má dym teplotu okolitého studeného vzduchu, jeho pohyb ovplyvňujú vonkajšie sily ako je komínový efekt, vietor a vzduchotechnické zariadenia. Ochladzovanie je intenzívnejšie pri prúde malými otvormi (škárkami), čo je spôsobené rozdielom medzi prietokom masy dymu a množstvom nasávaného studeného vzduchu. Pri prúde zvislými šachtami a schodišťovými priestormi je ochladzovanie okolitým vzduchom zanedbateľné, ochladzuje sa len prestupom tepla do stavebných konštrukcií.

Na pohyb a zmenu vlastností dymu má veľký vplyv výška stavby a vnútorné členenie. Výrazne sa to prejavuje pri átriových výškových stavbách (obr. 7-8), kde má veľký význam komínový efekt.



Obrázok 7-8 Pohyb dymu vo výškových stavbách (átriách) (Lougheed 2000)

Komínový efekt vzniká všade, ale najviac sa prejavuje vo výškových budovách. Jedná sa o silné vertikálne prúdenie v budove smerom od päty k streche. Je ovplyvnený výškou budovy, tesnosťou stien, tepelnými stratami medzi podlažiami a rozdielom teplôt vo vnútri a mimo budovy. Fyzikálnou príčinou je rozdiel hustôt vzduchu vo vnútri a vonku, ktorý vyvoláva tlakový rozdiel (podtlak dolu a pretlak hore, ak je teplota vo vnútri vyššia).

Vo výškových stavbách môže dôjsť k zvrstveniu dymu. Vzniká pri vertikálnom šírení tepla a dymu v uzavretej budove. Splodiny horenia stúpajú až do vyrovnania teploty vzduchu v budove. Vytvorí sa vrstva, ktorá zastaví ďalšie vertikálne stúpajúce splodiny horenia, tieto sa kumulujú a začínajú sa šíriť horizontálne. Dôsledkom tohto javu budú najväčším účinkom dymu vystavené stredné podlažia (obr. 7-9).



Obrázok 7-9 Kumulácia dymu v stredných podlažiach a jeho horizontálne šírenie (Phillips a kol. 2000)

7.2.

Riadenie dymu pri vnútorných požiaroch

7.2.1.

Pohyb dymu a kontrola dymu v budovách

Pri vnútorných požiaroch môže dym prúdiť prakticky do celej budovy. Spôsobuje zadymenie únikových ciest, ohrozuje zdravie a životy ľudí, poškodzuje majetok. Pojem riadenie dymu bol vytvorený v 60. rokoch 20. storočia pre systémy mechanicky vytváraného pretlaku na obmedzenie prietoku dymu počas požiarov. Výskum v oblasti kontroly dymu sa vykonával najmä v Austrálii, Kanade, Anglicku, Francúzsku, Japonsku, USA a západnom Nemecku.

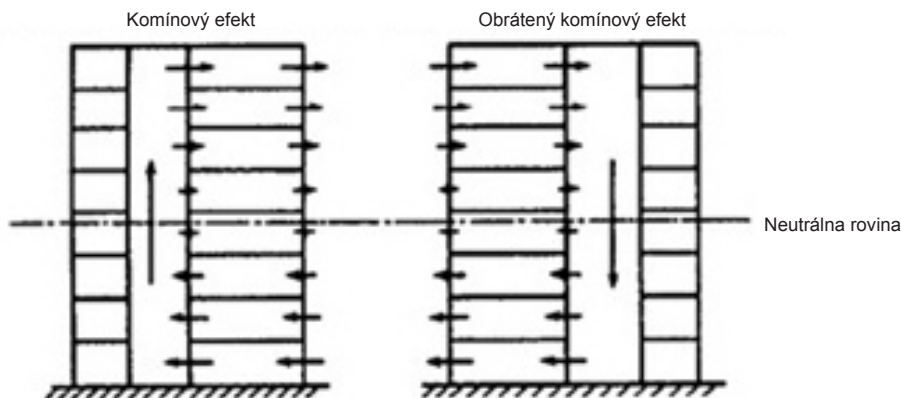
Nevyhnutným predpokladom inteligentného navrhovania systémov riadenia dymu je pochopenie základných princípov z oblasti pohybu dymu. Hnacie sily spôsobujúce pohyb dymu sú: komínový efekt, vztlak, expanzia plynov, vietor a vykurovací, ventilačný a klimatizačný systém (tzv. HVAC system). Pohyb dymu je spôsobovaný väčšinou ich kombináciou (Klote a kol., 1992 a Kolte 1995).

Normálny komínový efekt je vzostupný prúd vzduchu v šachtách budovy (schodiská, výťahové a mechanické šachty) pri nízkych vonkajších teplotách. Stúpanie vzduchu v šachte spôsobuje vztaková sila vzduchu, ktorá vzniká v dôsledku jeho vyššej teploty a nižšej hustoty oproti vonkajšiemu vzduchu. Výraznejší normálny komínový efekt sa prejavuje pri vyšších budovách a nižších vonkajších teplotách.

Pri teplote vonkajšieho vzduchu vyššej, ako teplota vzduchu v budove nastáva zosťupný pohyb vzduchu, ktorý sa prejaví ako **reverzný komínový efekt** (Obr. 7-10). Pri atmosférickom tlaku sa tlakový rozdiel ΔP v Pa vyjadrí:

$$\Delta P = K_S \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \cdot h \quad (\text{Pa}) \quad [7.3]$$

kde T_0 je vonkajšia teplota (K), T_1 je vnútorná teplota (K), h je výška nad neutrálnou rovinou (m) a K_S je koeficient.



Obrázok 7-10 Pohyb vzduchu pri normálnom a reverznom komínovom efekte (Klote a kol., 1992, 1995)

Ak pri normálnom komínovom efekte vypukne požiar pod neutrálnou rovinou, dym sa pohybuje so vzduchom a stúpa hore šachtou, pričom synergicky pôsobí vztlaková sila v dôsledku teploty dymu. V prípade požiaru nad neutrálnou rovinou dym prúdi šachtou do vyšších podlaží a podlažia pod neutrálnou rovinou sú relatívne nezadymené.

Horúci dym má v porovnaní so vzduchom nižšiu hustotu a preto jeho pohyb nahor je spôsobený **vztlakovou silou**. Tlakový rozdiel medzi ohniskom požiaru a okolím je vyjadrený rovnako, ako pri komínovom efekte (rovnica 7-3). Teplota unikajúceho dymu sa znižuje kvôli prenosu tepla a riedeniu studeným vzduchom a preto vztlakový efekt všeobecne klesá so vzdialenosťou od požiaru. Ale pri extrémne veľkých požiaroch môže byť tlakový rozdiel tak veľký, že je nad možnosťou technológie riadenia dymu.

Pohyb dymu je ovplyvnený aj **expanziou horúcich plynov**, ktoré môžu až niekoľkonásobne zväčšiť svoj objem. V požiarnej úseku s jedným otvorom dochádza k prúdeniu studeného vzduchu do budovy dolnou časťou a horúci dym prúdi von hornou časťou otvoru. Pomer objemových tokov plynov je úmerný pomeru absolútnych teplôt vo vnútri a vonku. V prípade otvorených dverí a okien je tlakový rozdiel v dôsledku expanzie plynu cez tieto otvory zanedbateľný. Avšak pri hermeticky uzatvorených miestnostiach tlakové rozdiely v dôsledku expanzie plynu môžu byť veľmi dôležité, nielen z hľadiska pohybu dymu.

Na pohyb dymu môže mať značný vplyv **vietor**. Tlak vetra pôsobiaceho na stenu sa vyjadri ako:

$$P_W = \frac{1}{2} \cdot C_W \cdot \rho_0 \cdot V^2 \quad (\text{Pa}) \quad [7.4]$$

kde C_w je bezrozmerný tlakový koeficient (-0,8 – 0,8), ρ_0 je hustota vonkajšieho vzduchu a V je rýchlosť vetra (Klote a kol., 1992, 1995). Tlakový koeficient závisí od geometrie budovy a od toho, či sa jedná o náveternú alebo záveternú stranu. Efekt vetra pri budovách so zatvorenými oknami je nepatrný, avšak pri budovách s otvorenými otvormi alebo pri voľne stojacich budovách má značný vplyv na pohyb vzduchu vo vnútri.

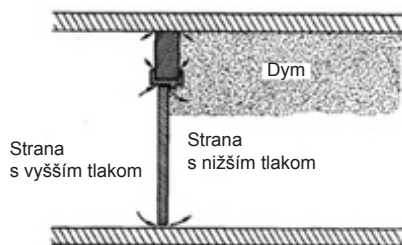
Pri požiaroch často dochádza k rozbitiu okien, ak sa tieto nachádzajú na záveternej strane, negatívny tlak spôsobený vetrom odvádza dym mimo požiarneho úseku. Ak sa rozbité okno nachádza na náveternej strane vietor tlačí dym po celom požiarom podlaží

aj mimo neho. Tlak vyvolaný vetrom môže byť relatívne veľký a dominantný pre pohyb dymu v celej budove.

Vykurovací, ventilačný a klimatizačný systém (HVAC) prispievajú k transportu dymu počas požiaru. V prvotných štádiách požiaru môžu však tieto systémy slúžiť ako pomocníka na jeho detekciu. V neskorších etapách požiaru negatívne vplyvajú na pohyb dymu v celom objekte a tiež privádzajú vzduch (oxidačný prostriedok) na miesto požiaru, čo napomáha horeniu a ešte väčšej tvorbe dymu. Po vypnutí HVAC systému síce nedochádza k prívodu vzduchu na ohnisko, ale dym sa šíri vzduchovými kanálmi a šachtami klimatizácie v dôsledku hnacích síl (vztlak, vietor, komínový efekt).

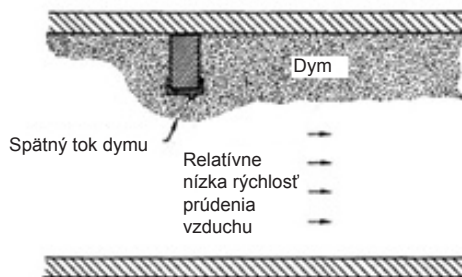
Riadenie dymu zahŕňa všetky metódy používané nezávisle alebo v kombinácii na usmerňovanie pohybu dymu. Tradičné metódy riadenia dymu sú použitie bariér, dymových ventilov, dymových šacht. Efektívnosť bariéry závisí na otvoroch v nej a na tlakovom rozdieli cez bariéru, ktorý závisí od hnacích síl pohybu dymu. Efektívnosť dymových ventilov a šacht závisí od vzdialenosti od požiaru, vztlaku dymu a prítomnosti ostatných hnacích síl (Klote a kol., 1992, 1995).

Kontrola pohybu dymu využíva princípy tradičného riadenia dymu – bariéry, v kombinácii s prúdením vzduchu a tlakovými rozdielmi, vytváranými mechanickými ventilátormi (obr. 7-11).

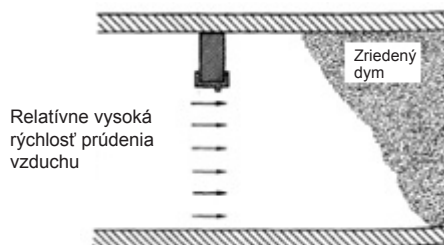


Obrázok 7-11 Bariéra oddelujúca zadymený priestor (Klote a kol., 1992, 1995)

Na obr. 7-11 sa v bariére nachádzajú zatvorené dvere. Strana s nižším tlakom je zadymená, na strane s vysokým tlakom sa môže nachádzať úniková cesta. Pretlak spôsobuje prúdenie vzduchu cez škáry okolo zatvorených dverí a v konštrukcii, čo bráni prieniku dymu do chránenej časti. Ak je pri otvorených dverách rýchlosť prúdenia vzduchu cez ne malá, dym môže prechádzať do chránenej časti (obr. 7-12), ak je dostatočne veľká, k spätnému toku nedochádza (obr. 7-13). Veľkosť rýchlosti potrebnej na zabránenie spätného toku dymu závisí od rýchlosti uvoľňovania energie pri požari.



Obrázok 7-12 Spätný tok dymu po odstránení bariéry (Klote a kol., 1992, 1995)



Obrázok 7-13 Rýchlosť prúdenia vzduchu bráni spätnému toku dymu po odstránení bariéry (Klote a kol., 1992, 1995)

Z uvedeného vyplývajú **dva základné princípy riadenia dymu pri vnútorných požiaroch**: 1. Prúd vzduchu riadi pohyb dymu, ak je jeho priemerná rýchlosť dostatočne veľká. 2. Ako kontrola dymu pôsobia tlakové rozdiely cez bariéru. Z fyzikálneho hľadiska je druhý princíp len špeciálnym prípadom prvého, no napriek tomu má veľkú dôležitosť pri navrhovaní systémov kontroly dymu (okrem iného aj v zdôraznení rozdielneho posudzovania kontroly dymu pri otvorených a zatvorených dverách).

Zo závislosti na rýchlosti pohybu vzduchu vyplývajú tri výhody „kontroly dymu“ oproti tradičnému „riadeniu dymu“ (Klote a kol., 1992, 1995):

1. Je menej závislá na nepriepustnosti dymu cez dymovú bariéru.
2. Je menšia pravdepodobnosť, že hnacie sily (komínový efekt, vztlak, vietor) prekonajú systém kontroly dymu (v prípade jeho absencie spôsobujú rozšírenie dymu v takej miere, ako dovoľujú otvory).
3. Môže byť navrhnutá, tak, aby bránila prúdeniu dymu do chráneného priestoru cez otvorené dvere (otvorené dvere počas evakuácie v priebehu požiaru).

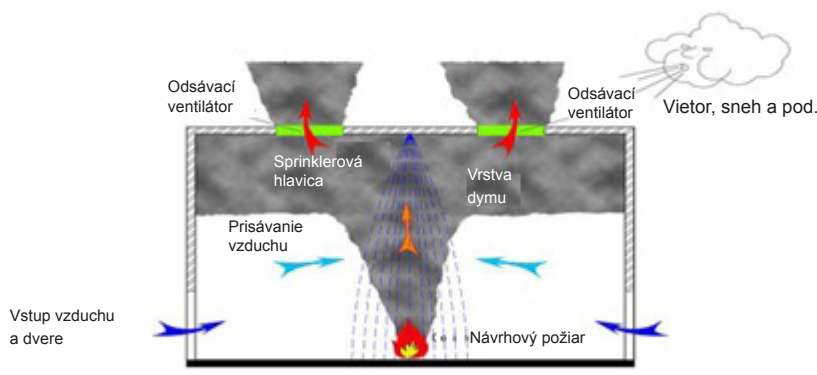
7.2.2.

Riadenie dymu vo veľkých priestoroch

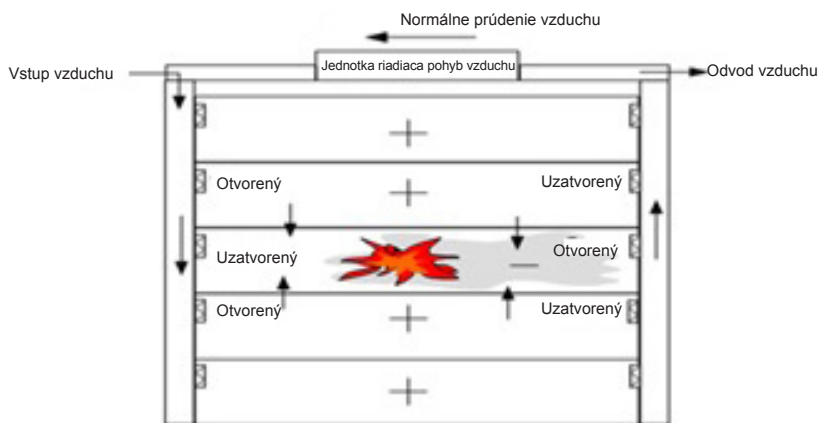
Budovy s veľkými priestormi, ktoré sú využívané pre šport, oddych a zábavu vyžadujú inštaláciu systému riadenia dymu na uskutočnenie bezpečnej evakuácie osôb počas požiaru. V týchto stavbách sa používajú viaceré metódy na odvod dymu (Harrison a kol. 2006).

Odvod dymu z najvyššieho podlažia. V prípade inštalácie zariadení na odvod tepla a spodín horenia sú horúce plyny zhromažďované pod strechou (na najvyššom podlaží) a odvádzané von. Dôležitým parametrom pri navrhovaní typu systému je výška neutrálnej roviny. Táto hodnota sa celosvetovo líši ale spravidla je to okolo 2 až 3 metre nad najvyšším bodom únikových ciest. Systém je nepriaznivo ovplyvňovaný vonkajšími poveternostnými podmienkami (vietor, sneh) (obr. 7-14).

Odvod dymu z každého podlažia. V prípadoch, keď je výška stúpania dymovej vrstvy od podlahy veľmi veľká, nie je vhodné vybaviť celý priestor jedným ventilačným systémom, ale využíva sa samostatné odsávanie dymu z každého podlažia (obr. 7-15).



Obrázok 7-14 Odvod tepla a splođín horenia z najvyššieho podlažia (Harrison a kol. 2006)



Obrázok 7-15 Odvod tepla a splođín horenia z jednotlivých podlaží (Harrison a kol. 2006)

Ak sú v obvodovej stene veľkých uzatvorených priestorov malé otvory (napríklad medzery medzi dverami a zárubňou, diery vo fasáde), je možné týmito otvormi zabezpečiť pohyb dymu do okolitého priestoru a takto znížiť tlak plynov v dymovej vrstve. Takto sa dym odstráni z dymom postihnutého priestoru spôsobom, ktorý udržiava želaný tlakový rozdiel a teda prúdenie vzduchu a plynov medzi daným uzatvoreným priestorom a okolitým prostredím. Táto technika je rovnaká ako technika používaná pri prirodzenej ventilácii v átriových priestoroch.

Regulácia teploty vetraním veľkých uzatvorených priestorov. Tento spôsob sa používa keď výška dymovej vrstvy nad podlahou nie je hlavným kritériom návrhu zariadení na odvod tepla a splođín horenia. Odsávanie dymu je použité s cieľom nepresiahnutia určitej maximálnej hodnoty teploty dymovej vrstvy. Tento prístup umožňuje použitie materiálov (napríklad povrchová úprava stien bez požiarnej odolnosti), ktoré by ináč boli teplom zničené.

Zaplnenie dymom. Tento prístup sa uplatňuje v budovách, ktoré majú zvlášť veľký vnútorný objem, takže zariadenia na odvod tepla a splođín horenia nie sú potrebné.

Metóda je účinná, ak dym môže byť zhromažďovaný v prázdnom podstrešnom priestore počas doby potrebnej na evakuáciu budovy. Výška dymovej vrstvy nesmie dosiahnuť neželanú hodnotu pred tým, ako oheň spotrebuje dostupné palivo.

Odstránenie dymu. V tomto prípade sa navrhuje dostatočná ventiláciu na odstránenie dymu z priestoru po potlačení požiaru.

7.3.

Dymový manažment vonkajších požiarov

7.3.1.

Charakteristika vybraných vonkajších požiarov

Na základe odlišností prenosu tepla a možnosti pohybu dymu pri horení môžeme rozdeliť požiare na vnútorné a požiare na otvorenej ploche. Medzi požiare na otvorenej ploche patria požiare otvorených technologických zariadení, požiare skladovacích nádrží, plošné požiare kvapalín, lesné požiare, požiare skládok uhlia a požiare poľnohospodárskych plodín.

Charakteristické znaky požiarov otvorených technologických zariadení vyplývajú z umiestnenia látok na voľnom priestranstve. Tieto zariadenia sú využívané najmä v chemickom a plynárenskom priemysle. Ich výhodou je z ekonomického hľadiska zníženie nákladov na výstavbu a jej urýchlenie, z hľadiska bezpečnosti je výhodou to, že sa pri využití horľavých látok (horľavých kvapalín) znižuje možnosť tvorby výbušných zmesí so vzduchom. Nevýhodou je to, že využívané výrobné aparatúry sú postavené v tesnej nadväznosti, často dosahujú značnú výšku a na relatívne malú plochu je sústredené alebo privádzané veľké množstvo horľavých látok a tieto sú spracovávané pri vysokých teplotách a tlakoch. Pri požiaroch otvorených technologických zariadení je dosahovaná vysoká rýchlosť horenia hneď od začiatku, vyvíja sa veľké množstvo tepla, tepelná radiácia dosahuje vysokú intenzitu a pohyb dymu je rýchly (Kvarčák 2005).

Pri popise požiarov skladovacích nádrží horľavých kvapalín je dôležité množstvo a vlastnosti horľavej kvapaliny a charakteristika nádrží. Väčšinou majú valcovitý stojatý tvar, môžu byť umiestnené nad zemou, pod zemou, čiastočne zapustené. Konštrukčne sa jedná o zariadenie s pevnou alebo plávajúcou strechou. Plávajúca strecha bráni vytvoreniu voľného priestoru na zhromažďovanie pár. Pri plnení a vyprázdňovaní dochádza k vyrovnávaniu tlaku cez otvory v plášti a streche. Plášť nádrže a horľavá kvapalina majú rôznu rozťažnosť pri zmene teploty. Nebezpečenstvom je horenie pár unikajúcich cez otvory, prenesenie požiaru zvonku (zariadenie proti prešľahnutiu plameňa). Požiaru horľavých kvapalín často predchádza výbuch. Tento spôsobuje deformácie nádrží, porušenie celistvosti, odhodenie strechy. V nádržovom parku sa môžu prejaviť domino efekty.

Na skládkach uhlia sa nachádzajú desiatky až tisíce ton uhlia. Bývajú umiestnenie mimo zástavbu, v mieste s prevládajúcim smerom vetra od zástavby. Požiarom skládok uhlia predchádzajú zmeny uhlia na skládkach, oxidácia a zvetrávanie, zvyšovanie teploty.

Prejavuje sa zápar a únik pary, suché miesta za dažďa, topiaci sa sneh. Fyzikálne a chemické zmeny vedú k samovznieteniu v hromade pri 65–70 °C (Kvarčák 2005).

Pri lesných požiaroch dochádza k horeniu súboru organických látok. Ich charakteristické znaky sa líšia podľa toho, či sa jedná o požiar podzemný, pozemný, korunový, lesnej kalamity alebo kombinovaný. Vznik a pohyb dymu je výrazne ovplyvnený palivom a klimatickými podmienkami.

Z uvedených stručných popisov vybraných typov vonkajších požiarov je zrejmé, že poznanie ich špecifických charakteristík je dôležitým východiskom pre odhad vzniku, chemických, fyzikálno-chemických a fyzikálnych vlastností dymu. Vzniknutý dym podľa jeho množstva a vlastností mení kvalitatívne parametre ovzdušia krátkodobo (hodiny a dni) alebo dlhodobo (mesiace a roky). Vlastnosti dymu a jeho šírenie (pohyb) a rozptyl v ovzduší sú východiskom pre dymový manažment vonkajších požiarov.

7.3.2.

Zloženie a pohyb dymu pri vonkajších požiaroch

Zloženie dymu vonkajších požiarov je ovplyvnené typom paliva, teplotou a pohybom vzduchu. Medzi hlavné chemické zložky dymu pri vonkajších požiaroch patria CO_2 , H_2O , CO , SO_2 , NO_2 , uhľovodíky, akroleín, benzén, formaldehyd. V dyme sa nachádzajú produkty horenia, termického rozkladu, ale aj čiastočnej oxidácie paliva v plynnom, ale aj v tuhom a v kvapalnom skupenstve. Tieto látky môžu spôsobiť intoxikáciu organizmu človeka alebo vyvolať respiračné problémy.

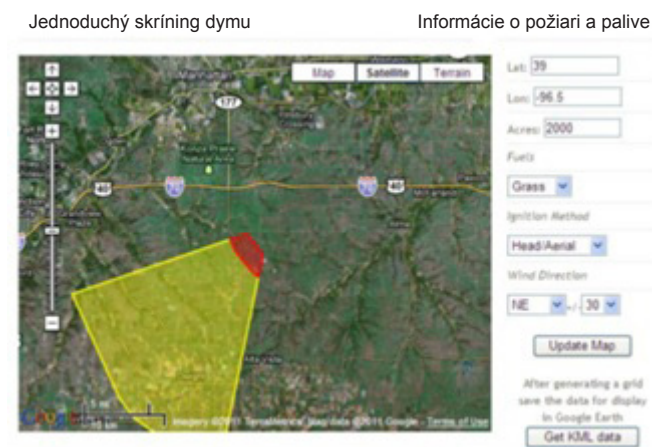
Vzniknutý dym sa pohybuje vo vertikálnom aj horizontálnom smere. Na rozptyl dymu v ovzduší majú vplyv vonkajšie poveternostné podmienky (rozdiel teplôt, vztlaková sila, rýchlosť a smer vetra) (obr. 7-16). V prípade stabilných podmienok, ustálenom vetre, nedochádza k pohybu vo vertikálnom smere. Viditeľnosť sa znižuje v dôsledku akumulácie dymu. Pri nestabilných podmienkach, silnom vetre, dym uniká do veľkých výšok a nedochádza k zníženiu viditeľnosti.



Obrázok 7-16 Pohyb dymu v ovzduší pri stabilných (vľavo) a nestabilných (vpravo) podmienkach (Drysdale 1999)

V konkrétnych podmienkach možno pohyb a rozšírenie dymu pri prírodných požiaroch predpovedať a vizualizovať použitím softvérových nástrojov v súlade s informáciami o type a množstve paliva, charakteristikách terénu a atmosférických podmienkach

na danom území. Takýmto nástrojom je aj Simple Smoke Screening, ktorého ukážka výstupu je na obr. 7-17. Červená plocha znamená oblasť s kritickým dopadom dymu a žltá plocha oblasť zasiahnutú dymom v dôsledku pôsobenia vetra.



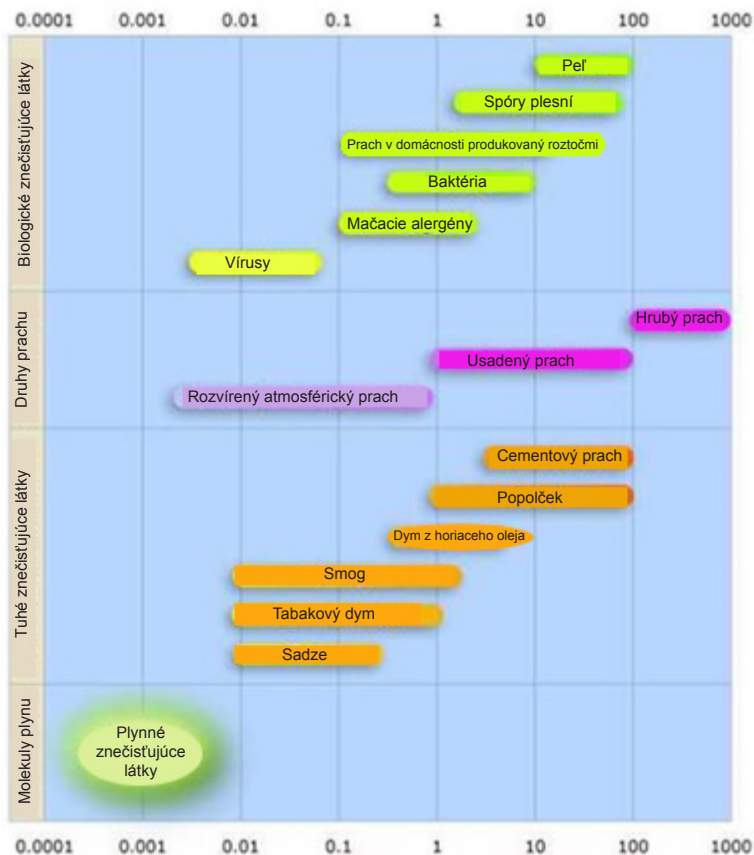
Obrázok 7-17 Ukážka výstupu z programu Simple Smoke Screening (NRCS)

7.3.3.

Kvalitatívne parametre ovzdušia

Vzniknutý dym má významný vplyv na kvalitu ovzdušia. Kvalita ovzdušia je charakteristika vzduchu, indikovaná prítomnosťou polutantov, napr. disperzných častíček (PM), ale aj plynov, napr. SO_2 , NO_2 , O_3 , CO a optickou hustotou (priehľadnosťou). Dymový manažment vonkajších požiarov má zabezpečiť akceptovateľné koncentrácie polutantov v ovzduší (disperzných častíček a chemických látok) bez negatívneho účinku na zdravie ľudí. Príklad distribúcie polutantov ovzdušia podľa veľkosti častíc (μm) je na obr. 7-18. Veľkosť častíček dymu a sadzí je v rozmedzí 0,1 – 10 μm .

Primárnym indikátorom kvality ovzdušia je koncentrácia disperzných častíček. Disperzné častíčky (particulate matters PM) existujú v dyme v pevnom alebo kvapalnom skupenstve. Častíčky $\text{PM}_{2,5}$ majú priemer menší alebo rovný ako 2,5 μm , častíčky PM_{10} majú priemer menší alebo rovný ako 10 μm (zahŕňa $\text{PM}_{2,5}$). Vdýchnutie jemných častíček spôsobuje dýchacie problémy a rakovinové ochorenia. Platí, že 24 hodinová koncentrácia $\text{PM}_{2,5}$ nesmie presiahnuť $< 65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a priemerná ročná koncentrácia $\text{PM}_{2,5}$ nesmie presiahnuť $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. V dyme pri lesných požiaroch sa nachádza 70 % častíček $\text{PM}_{2,5}$ a 10 % častíček PM_{10} (Weir a Carlson 2007).



Obrázok 7-18 Veľkosti častíc polutantov ovzdušia (µm) (<http://www.examiner.com/article/study-air-pollution-kills-two-million-people-per-year>)

7.3.4.

Úlohy dymového manažmentu riadených vonkajších požiarov

Pri neplánovaných vonkajších požiaroch vzniká veľké množstvo nebezpečného dymu. Pri plánovaných (riadených) požiaroch možno minimalizovať negatívne účinky dymu na ľudí a životné prostredie a tak isto aj predchádzať neplánovaným požiarom a ich negatívnym účinkom. Uplatnenie nachádzajú napr. pri lesných požiaroch. Podstatou je riadenie množstva paliva a využitie vhodných klimatických podmienok.

Riadenie dymu pri vonkajších požiaroch využíva uplatnenie postupov a definovanie požiadaviek pre plánované prírodné požiare. Programy riadenia dymu zahŕňajú: procesy schválenia plánovaného riadeného horenia, metódy minimalizácie vzniku dymu (emisií, polutantov) najmä úpravou alebo zmenšovaním množstva paliva, charakterizáciu klimatických podmienok zaručujúcich minimalizáciu negatívnych účinkov vzniknutých splodín horenia, plánovanie redukcie pôsobenia dymu, vzdelávanie verejnosti, posúdenie efektívnosti postupov, a periodickú evaluáciu programu.

7.3.5.

Metódy riadenia dymu pri plánovaných požiaroch

Pri vonkajších požiaroch, predovšetkým lesných a poľnohospodárskych plodín, vznikajúci dym kontaminuje atmosféru, dochádza k rozširovaniu emisií, ale aj k ukladaniu vznikajúcich látok do pôdy a vody. Preto sa využíva aplikácia techník znižovania množstva dymu a riedenie emisií pri vonkajších požiaroch riadeným spaľovaním. Medzi hlavné úlohy riadenia dymu v týchto prípadoch patrí minimalizácia množstva dymu vstupujúceho do oblastí sídiel, diaľnic, nemocníc, ochrana verejného zdravia, predchádzanie nadmernému a nežiaducejmu znečisťovaniu ovzdušia. Medzi nepriame ciele patrí znižovanie požiarneho rizika. Základnými používanými technikami sú metódy znižovania množstva emisií a redistribúcie emisií (Ottmar a kol. 2001).

Emisie z vonkajších požiarov obsahujú množstvo znečisťujúcich látok a toxických zlúčenín. Metódy na zníženie emisií, ak sú použité so zreteľom na vhodnosť pre konkrétnu oblasť a v súlade s vhodnými meteorologickými podmienkami, môžu znížiť množstvo škodlivín až o 60 %.

Takýmito metódami je riadené spaľovanie. Ak pri ňom prebieha plameňové horenie, tvorí sa menšie množstvo emisií v pomere k množstvu paliva. Pri tlení je účinnosť spaľovania nižšia, s vyššou tvorbou emisií. Rozhodnutia pri použití určitej spaľovacej techniky sú ovplyvnené mnohými faktormi. Medzi dôležité aspekty patrí zabezpečenie verejnej bezpečnosti, udržanie kontroly nad ohňom a jeho udržanie v danom obvode, v súlade s predpismi o životnom prostredí, a minimalizácia nebezpečenstva dymu, minimalizácia prevádzkových nákladov a maximalizácia a pravdepodobnosti dosiahnutia cieľa spaľovania.

7.3.5.1.

Zmenšenie množstva dymu pri vonkajších požiaroch

Zmenšenie množstva dymu možno dosiahnuť: zmenšením plochy horenia (vypalovania), zmenšením množstva paliva, zmenšením produkcie paliva.

Zmenšenie plochy horenia možno dosiahnuť koncentráciou paliva, izolovaním paliva a mozaikovým vypalovaním. Pri koncentracii je palivo sústredené na jednom mieste, aby nehořela celá plocha. Pri izolácii sa odstraňuje palivo, ktoré má tendenciu dlho tlieť a palivo sa ohraničuje s využitím prírodných látok (sneh, prekážky) alebo chemických látok (pena, retardér horenia). Pri mozaikovom vypalovaní sa vytvára mozaika spálených a nespálených oblastí, ktoré sa po čase prepoja. Tieto oblasti sa vyberajú podľa typu paliva, vlhkosti s cieľom predchádzať veľkému a intenzívnemu požiaru. Často sa využíva aj na ozdravenie lesov.

Zmenšenie množstva paliva pri lesnom požiari sa vykonáva mechanickým odstránením dreva a jeho kontrolovaným spálením alebo ďalším spracovaním. Množstvo odstráneného paliva je priamo úmerné zníženiu množstva dymu.

7.3.5.2.

Prerozdelenie emisií

Emisie môžu byť priestorovo a časovo rozdelené v období dobrých rozptylových podmienok v atmosfére v prípade prevládajúceho vetra v smere od citlivých oblastí. Prerozdelenie emisií neznamená zmenšenie ich celkového množstva. **Metódy prerozdelenia emisií sú:** spaľovanie za dobrých atmosférických podmienok, zdieľanie emisií, vyhýbanie sa citlivým oblastiam, spaľovanie v menších množstvách, pravidelné spaľovanie (Ottmar a kol. 2001).

Dobré rozptylové podmienky sú spravidla ráno, po prelomení inverznej vrstvy a pred vytvorením večernej inverzie. Pri dobrých rozptylových podmienkach sa dym riedi väčším objemom vzduchu a preto je jeho koncentrácia nižšia (Weir a Carlson 2007).

Zdieľanie emisií znamená aplikáciu programov riadenia dymu pre väčšie územné oblasti, čím sa zníži pravdepodobnosť nepriaznivého dopadu dymu. Pod pojmom vyhýbanie sa citlivým oblastiam treba rozumieť spaľovanie pri prevládajúcom smere vetra od diaľnic, letísk a sídiel. Spaľovanie v menších množstvách, rozdelenie do viacerých dní zníži krátkodobé emisie. Pravidelné spaľovanie neumožňuje hromadenie paliva, tým sa znižujú emisií pri každom horení. Táto technika má všeobecne pozitívny vplyv na krajinu a znižuje počty lesných požiarov (Ottmar a kol. 2001).

8

Stopy po požiaroch a odber vzoriek

Stopy po požiaroch môžu byť zjednodušene definované, ako zmeny spôsobené požiarom na základe ktorých je možné zistiť príčinu a spätne odhadnúť priebeh požiaru.

Stopa po požiaroch je viditeľná alebo merateľná fyzická zmena alebo identifikovateľná tvary, vzniknuté vplyvom požiaru alebo zoskupením viacerých účinkov požiaru. Účinky požiaru sú sledovateľné alebo merateľné zmeny vo vnútri alebo na povrchu materiálu, ako výsledok pôsobenia ohňa (NFPA 921:2014).

Aj keď je predkladaná publikácia zameraná na zisťovanie príčin vzniku požiarov a nie ich vyšetrovanie, tieto dve činnosti spolu úzko súvisia (zistenie príčiny vzniku požiaru je súčasťou vyšetrovania). Preto bude úvod tejto kapitoly venovaný všeobecnému popisu stôp tak, ako je uvádzaný v kriminalistike.

8.1.

Kriminalistický popis stôp

Kriminalistická stopa je každá zmena v objektívnej realite (v materiálnom prostredí alebo vedomí človeka), ktorá príčinne alebo aspoň miestne alebo časovo súvisí s kriminalisticky relevantnou udalosťou (trestným činom), obsahuje kriminalisticky alebo trestnoprávne relevantnú informáciu, ktorú možno zistiť, zaistiť a skúmať na základe súčasných vedecky uznávaných kriminalistických metód, prostriedkov a postupov (Polák a Kubala 2010). Musil a kol. (2011) uvádzajú ako dôležitú podmienku, že stopa musí existovať minimálne od svojho vzniku do jej zistenia.

Najvšeobecnejším východiskom pre formulovanie problematiky kriminalistických stôp je všeobecná teória vzájomného pôsobenia. Podľa tejto teórie dochádza pri vzájomnom, súčasnom pôsobení dvoch alebo viacerých objektov k vzájomnej výmene informácií o pôsobení jednotlivých objektov a o ich vlastnostiach. Takto na seba neustále pôsobí veľké množstvo rôznych objektov, pričom nastáva veľké množstvo zmien. Tieto deje prebiehajú úplne bežne a stretávame sa s nimi pri každodennej ľudskej činnosti (Musil a kol. 2001).

Ako príklad takýchto udalostí možno uviesť: pôsobenie pneumatiky vozidla na mäkký povrch, po ktorom sa vozilo pohybuje, spôsobuje deformáciu tohto povrchu a naopak rôzne podiely z mäkkého povrchu sa zachytia na pneumatike; obuv pri chôdzi na pevnom povrchu zanecháva rôzne odpadávajúce častice nečistôt a naopak dochádza k postupnému opotrebovaniu podrážky a pod. (Musil a kol. 2001).

Uvedené zmeny nie sú po svojom vzniku nemenné, ale podliehajú rôznym vplyvom, ktoré môžu spôsobiť až ich zánik. Preto je potrebné venovať tejto skutočnosti patričnú

pozornosť. Existujú zmeny, ktoré sa prakticky nemenia dlhú dobu, ale aj také, ktoré behom krátkej doby zaniknú. Typickými dôvodmi zániku zmien sú napr. (Musil a kol. 2001):

- **úmyselné zničenie stopy** osobou, ktorá je zainteresovaná na neexistencii stôp (páchatel trestného činu zničí stopu obuvi),
- **neúmyselné zničenie stôp** (príslušníci Policajného zboru sa nevhodne pohybujú po mieste činu a dotýkajú sa predmetov bez toho aby preverili, či na nich nie sú prítomné stopy, na mieste činu sú zničené stopy osobami, ktoré sa po ňom pohybujú),
- **pôsobením prírodných vplyvov** (dažďa, vlhka, sucha, vetra a pod.) alebo pôsobením procesu, ktorý stopu mení (biochemický rozklad biologických stôp, pôsobenie korózie),
- **pôsobenie prirodzených vlastností nositeľa stopy** (tvarová pamäť plastických hmôt, ktorá vedie k snahe o navrátenie plastickej hmoty do pôvodnej podoby, zabúdanie informácií vo vedomí človeka a pod.).

Na tomto mieste je potrebné upozorniť, že v prípade úmyselne spôsobených požiarov (ale aj požiarov spôsobených z nedbanlivosti) dochádza často k zničeniu kriminalistických stôp samotným protipožiarnym zásahom. Aj keď príslušníci hasičských jednotiek (ale aj osoby vykonávajúce zásah do ich príjazdu) sú povinný konať tak, aby svojou činnosťou neničili prípadné stopy nie vždy je to možné. Typickým príkladom je potreba rýchleho konania v prípade záchranu ľudského života alebo zastavenie šírenia sa požiaru (ktorého rozšírenie by mohlo spôsobiť značné materiálne škody). V takomto prípade sa však často vytvárajú stopy nové (pamätové). Predovšetkým členovia hasičských jednotiek (príslušníci HaZZ) a zamestnanci závodných hasičských zborov by však mali byť dôkladne odborne pripravený na to, ktoré zmeny (kľúčové pre zistenie príčin vzniku požiaru) si počas zásahu všimnúť a ak je to možné, tak aj fotograficky dokumentovať. Typickým príkladom takýchto zmien sú napr. násilne otvorené vchodové dvere alebo okno na objekte ešte pred zásahom, prítomnosť prázdnych nádob so zvyškami horľavej kvapaliny, prítomnosť tlakových nádob plynu na mieste vzniku požiaru a pod.

Okrem osôb vykonávajúci zásah do príjazdu hasičskej jednotky a samotných hasičských jednotiek môže neúmyselne zničiť kriminalistické stopy aj samotný zisťovateľ. Toto sa môže stať predovšetkým v prípadoch, kedy v počiatočnom štádiu nie je v súvislosti s požiarom podozrenie na spáchanie trestného činu. Preto je veľmi dôležité, aby z hľadiska ochrany kriminalistických stôp pristupoval zisťovateľ vzniku požiarov ku každému požiaru, ako k potenciálnemu trestnému činu až kým sa nepreukáže opak. Na tomto mieste je potrebné upozorniť, že trestný čin môže byť v súvislosti s požiarom spáchaný aj pri pomerne neočakávaných okolnostiach. Typickým príkladom je požiar od úderu blesku. Väčšina laických osôb by takýto požiar považoval za požiar z objektívnej príčiny za ktorý nie je zodpovedná žiadna konkrétna osoba. Ak sa však preukáže, že stavba nespĺňala požiadavky platných právnych predpisov na ochranu pred bleskom (atmosférickou elektrinou) môže byť v takomto prípade voči zodpovednej osobe (zodpovedným osobám) vyvodená trestnoprávna zodpovednosť.

Pre vymedzenie pojmu „kriminalistická stopa“ je potrebné stanoviť kritériá, ktoré musí zmena v živej alebo neživej prírode alebo vedomí človeka spĺňať. Tým dôjde k vymedzeniu skupiny kriminalistických stôp z veľkého počtu najrôznejších existujúcich zmien. Z matematického hľadiska predstavujú kriminalistické stopy podmnožinu z množiny najrôznejších zmien (Musil a kol. 2001).

Musil a kol. (2001) uvádzajú nasledovné základné kritériá, ktoré musí zmena spĺňať, aby mohla byť považovaná za kriminalistickú stopu:

- musí sa jednať o stopu, ktorá je v príčinnej alebo inej súvislosti s kriminalisticky relevantnou udalosťou,
- doba existencie zmeny musí byť aspoň od jej vzniku do zistenia,
- zmena musí byť dekódovateľná (skúmateľná) existujúcimi kriminalistickými metódami a prostriedkami.

Musil a kol. (2001) delia kriminalistické stopy podľa **mechanizmu ich vzniku** a podľa **druhu zmien v materiálnom prostredí**.

Podľa mechanizmu vzniku sa kriminalistické stopy delia na (Polák a Kubala 2010):

- **zmeny vo vedomí ľudí** (pamäťové stopy),
- **zmeny v materiálnom prostredí** (materiálne stopy).

Pamäťová stopa je zmena vytvorená kriminalisticky relevantnou udalosťou vo vedomí človeka. Vzniká odrazom (vnemom) vo vedomí človeka na základe ľudských zmyslov, pričom ide o proces vnemov, pocitov, predstáv a vnímania nezávislých od vôle človeka. Na všetky tieto podnety pôsobia subjektívne vplyvy, akými sú strach, schopnosť zapamätania a inteligenčná úroveň osoby (Polák a Kubala 2010).

Skutočnosť určujúce vylučnosť pamäťových stôp (Polák a Kubala 2010):

- vznikajú sprostredkované pomocou ľudských zmyslov (sluchové, zrakové, čuchové, hmatové a chuťové stopy),
- ich tvorba nie je doteraz dostatočne objasnená, existujú krátkodobé, strednodobé a relatívne trvalé pamäťové stopy,
- ich kvalita a kvantita je ovplyvnená vlastnosťami konkrétnej osoby (spôsob vnímania, fixovania a reprodukovania),
- nevznikajú (nie sú fixované v pamäti) vždy ihneď po určitom vneme,
- spravidla by sa nemali využívať opakovane (najmä by sa nemali opakovať výsluchy),
- sú nedostupné, pokiaľ ich osoba nechce alebo nemôže reprodukovať,
- definitívne sa strácajú smrťou osoby – nositeľa pamäťovej stopy.

Na tomto mieste je potrebné upozorniť, že v kriminalistickej praxi vzniká väčšina stôp ako sluchové a zrakové. V prípade požiarov ale môžu zohrať významnú úlohu aj stopy čuchové (požiar je často zachytený osobami práve vďaka šíriacemu sa dymu – splodiny horenia).

Materiálna stopa je zmena vytvorená kriminalisticky relevantnou udalosťou v materiálnom prostredí (Polák a Kubala 2010).

Podľa druhov informácií, ktoré stopy obsahujú sa stopy delia na (Polák a Kubala 2010):

1. **stopy, ktoré obsahujú základné informácie o štruktúre vonkajšej stavby objektov** (najmä daktyloskopické, mechanoskopické, balistické a trasologické stopy),
 - a) statické (vtlačky a ryhy),
 - b) dynamické (zmliaždené a zošinuté stopy),
2. **stopy, ktoré obsahujú základnú informáciu o štruktúre vnútornej stavby objektov** (bologické, chemické, pyrotechnické, defektoskopické stopy, stopy písacích strojov, textilné vlákna a mikrostopy),
3. **stopy, ktoré obsahujú informáciu o funkčných a dynamických vlastnostiach a návykoch**; táto skupina stôp má základ v tvorbe dynamického stereotypu a pohybového návyku (najmä stopy hlasu, reči, chôdze a behu, cestička lokomócie, stopy ručného písma, stopy iných funkčných a dynamických vlastností a návykov, napr. stopy návykov správania na mieste činu, stopy pracovných návykov pri používaní nástrojov pri vlámaní),

4. **stopy, ktoré obsahujú združenú informáciu o vlastnostiach objektu alebo objektov**, ktoré ju vytvorili (napr. daktyloskopická stopa vytvorená krvou, stopa obuvi odrážajúca nie len markanty podošvy, ale aj spôsob chôdze a pod.),
5. **účtové a počítačové stopy** (účtovné výkazy a bilancie, účtovné doklady, stopy v softvéri).

Podľa druhu zmien, ktoré nastali pri ich vzniku v materiálnom prostredí, sa stopy delia na (Polák a Kubala 2010):

1. **ústretové stopy** – stopy, ktoré odrážajú vzájomné pôsobenie dvoch objektov (napr. mikrostopy, stopy vytvorené pri dopravných nehodách vozidlami zmiešaním náterových systémov),
2. **plošné a objemové stopy** – podľa toho, či objekt vytvárajúci stopu deformuje alebo nedeformuje objekt prijímajúci stopu,
3. **statické a dynamické stopy** – podľa charakteru pohybu objektu, ktorý stopu vytvoril:
 - a) statická stopy,
 - stopy navrstvenia (na nositeľa stopy sa preniesla nejaká hmota, napr. nečistoty, krv a pod.),
 - stopy odvrstvenia (z nositeľa stopy bola nejaká hmota odstránená, najčastejšie nečistoty),
 - b) dynamické stopy – ryhy, zošinuté stopy a zmliaždené stopy,
4. **periférne stopy** – poskytujú informáciu o pôdoryse objektu, ktorý ich vytvoril (vznikajú napr. pri premiestnení nábytku),
5. **stopy oddelenia časti z celku** (napr. roztrhané písomnosti, úlomky nástrojov, črepiny skla a pod.),
6. **mikrostopy**:
 - a) mikrostopy, ktoré majú charakter stôp, ktoré odrážajú vonkajšiu štruktúru objektu, ktorý ich vytvoril (mikrostopy s charakterom balistických, trasologických, mechanoskopických a daktyloskopických stôp),
 - b) mikrostopy, ktoré majú charakter stôp rovnosti objektu (náterové systémy, textilné vlákna, biologické náter a pod.),
 - c) mikrostopy, ktoré majú charakter zmien štruktúry skúmaného objektu (tento druh mikrostop má však minimálny význam),
 - d) mikrostopy, ktoré majú charakter odrazu funkčných a dynamických vlastností,
7. **počítačové stopy**:
 - a) technické (akákoľvek technika a mechanika, ktorá tvorí súčasť počítača),
 - b) dátové (informácie na nosičoch dát, ktoré môžu byť vytvorené užívateľom alebo inou osobou).

8.2.

Stopy po požiari

V oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov je zaužívané iné delenie stôp (po požiari). Z hľadiska informácie, ktorú stopa po požiari poskytuje môžu byť tieto rozdelené na:

- stopy indikujúce miesto vzniku požiaru,
- stopy indikujúce čas vzniku požiaru,
- stopy indikujúce smer šírenia požiaru (za určitých okolností tvoria jednu skupinu so stopami indikujúcimi miesto vzniku požiaru, nakoľko zistený smer šírenia uľahčuje

- stanovenie miesta vzniku požiaru),
- stopy indikujúce intenzitu požiaru,
- stopy indukujúce zanedbanie povinností na úseku ochrany pred požiarom,
- stopy indikujúce úmyselné spôsobilé požiaru.

Podľa NFPA 921:2014 vznik **charakteristických stôp po požiaroch má tri základné príčiny: teplo** (uvoľnené pri požiaroch), **ukladanie** (nánosy) a **spotrebovanie** (úbytok hmotnosti horľavých látok). Systematická analýza stôp po požiaroch umožňuje zistenie tepelného zdroja, ktorý ich spôsobil.

8.2.1.

Stopy indikujúce miesto a čas vzniku požiaru

Vo všeobecnosti platí pravidlo, z ktorého existuje len minimum výnimiek, podľa ktorého je pred stanovením príčiny vzniku požiaru potrebné poznať miesto jeho vzniku (výnimku predstavujú napr. úmyselne založené požiare pri ktorých sa páchatel pod ťarchou dôkazov prizná – napr. na základe kamerového záznamu ako vstupuje do objektu s akcelerátorom požiaru, a až následne popíše miesto vzniku požiaru). Vo všeobecnosti sa ale dá tvrdiť, že v prevažnej väčšine prípadov nie je bez stanovenia miesta vzniku požiaru zistenie jeho príčiny možné. V procese stanovenia miesta vzniku požiaru má dôležitú úlohu analýza časového priebehu vzniku a rozvoja požiaru. Presnejšie je však hovoriť o analýze časového priebehu činností predchádzajúcich vzniku (zisteniu) požiaru, analýze časového priebehu vzniku a rozvoja požiaru a analýze činností vykonávaných po vzniku (zistení požiaru). Skrátene bude v predkladanej publikácii používaný pojem analýza časového priebehu požiaru a súvisiacich udalostí. Pod súvisiacimi udalosťami sa rozumejú všetky udalosti, ktoré súviseli s príčinou, spôsobom rozvoja, miestom alebo časom vzniku požiaru.

Zistenie presného času vzniku požiaru je v mnohých prípadoch úloha ťažšia ako zistenie miesta a samotnej príčiny vzniku požiaru. Napriek uvedenému faktoru existujú prípady, kedy je možné zistiť s pomerne vysokou presnosťou čas vzniku požiaru. Aj v prípadoch kedy nie je možné presné stanovenie času vzniku požiaru je potrebné na základe dostupných informácií vykonať analýzu časového priebehu požiaru a súvisiacich udalostí.

Materiálne stopy umožňujúce presné zistenie času vzniku požiaru nevznikajú pri každom požiaroch. Medzi stopy umožňujúce zistiť čas vzniku požiaru patrí predovšetkým:

- záznam z ústredne elektrickej požiarnej signalizácie alebo iného požiarotechnického zariadenia,
- znefunkčnené hodiny následkom tepla z požiaru z ktorých je možné odčítať čas ich zastavenia.

Ak je stavba chránená elektrickou požiarnou signalizáciou alebo iným požiarotechnickým zariadením s hlásičmi požiaru a ústredňou zaznamenávajúcou jej stav (pokoj, požiar, poruchy, skúšania a deaktivácie) je možné čas vzniku požiaru odhadnúť na základe záznamov z uvedenej ústredne.

Okrem elektrickej požiarnej signalizácie môžu byť hlásičmi požiaru s ústredňou zaznamenávajúcom jej stav vybavené niektoré druhy stabilného hasiaceho zariadenia (napr. plynového) a zariadenia na odvod tepla a splodín horenia. Okrem toho existujú na trhu kombinované systémy, ktoré v sebe integrujú poplachový systém narušenia a elektrických

požiarnu signalizáciu. S pomerne vysokou pravdepodobnosťou bude na vzniknutý požiar reagovať aj samotný poplachový systém narušenia (skutočnosť či bude poplachový systém narušenia reagovať na vzniknutý požiar alebo nie závisí od použitého druhu senzora). Dôvodom prečo poplachový systém narušenia ako taký nenahrádza elektrickú požiarnu signalizáciu (aj v prípadoch kedy by jeho senzor dokázal zaznamenať aj sprievodné javy požiaru) je skutočnosť, že elektrická požiarna signalizácia spravidla chráni priestor pred požiarom nepretržite, zatiaľ čo poplachový systém narušenia len v určitých dňoch a hodinách dňa (napr. predajňu alebo kanceláriu v mimopracovnej dobe). Ďalším dôvodom je spravidla pomalšia reakcia poplachového systému narušenia na vzniknutý požiar ako elektrickej požiarnej signalizácie (napr. detektor rozbitia skla by zachytil požiar až vo fáze, kedy by následkom teplotného rozdielu došlo k deštrukcii okenného skla).

Čas zaznamenaný ústredňou požiarnotechnického zariadenia alebo poplachového systému narušenia, ale nemôže byť automaticky stotožnený s časom vzniku požiaru. Na takéto stotožnenie je potrebné zohľadniť ďalšie okolnosti. Prvou je nastavený čas ústredne tohto zariadenia, druhou (najdôležitejšou okolnosťou) preverenie, či požiar skutočne vznikol v priestore chránenom hlásičom, ktorý reagoval ako prvý a treťou reakčný čas hlásiča.

Zohľadnenie nastaveného času ústredne je pomerne jednoduché a je založené na porovnaní aktuálneho času ústredne s presným časom, prípadne ak je z ústredne zabezpečený diaľkový prenos informácií je potrebné vychádzať z času zaznamenaným pracoviskom (napr. pult centrálnej ochrany) na ktoré bol signál o požiaru vyslaný a zaznamenaný.

Najdôležitejšou skutočnosťou, ktorú je v tomto prípade potrebné preveriť je zistenie, či požiar vznikol v mieste chránenom hlásičom, ktorý reagoval ako prvý. Pred popisom uvedeného postupu je potrebné uviesť základné rozdelenie hlásičov elektrickej požiarnej signalizácie. Hlásiče elektrickej požiarnej signalizácie sa delia na hlásiče citové na:

- dym,
- teplo,
- infračervené vyžarovanie plameňa,
- oxid uhoľnatý,
- kombinované hlásiče.

Hlásiče citlivé na dym sa ďalej delia na hlásiče citlivé na optické vlastnosti dymu (útlm alebo rozptyl) a hlásiče citlivé na schopnosť dymu absorbovať α častice. V súčasnosti sa spomedzi dymových hlásičov vyrábajú takmer výlučne hlásiče citlivé na optické vlastnosti dymu, ale v starších objektoch sa stále môžeme stretnúť aj s hlásičmi citlivými na schopnosť dymu absorbovať α častice.

Preverenie či požiar skutočne vznikol v priestore chránenom hlásičom požiaru, ktorý zaznamenal požiar ako prvý je založený na dvoch relatívne samostatných úkonoch. Prvým je preverenie, či sa v tomto mieste nachádzajú stopy indikujúce miesto vzniku požiaru (popis týchto stôp je uvedený v ďalších častiach tejto podkapitoly). Druhým je preverenie, či sprievodný jav požiaru (ktorý vyvolal reakciu hlásiča) nebol rozšírený z iného priestoru, ktorý buď nebol chránený hlásičom požiaru alebo bol chránený nevhodným, prípadne nefunkčným hlásičom. Posúdenie vhodnosti, resp. nevhodnosti druhu hlásiča na ochranu konkrétneho priestoru musí vychádzať výlučne z technických parametrov hlásiča. V minulosti sa síce v odbornej literatúre a materiáloch výrobcov uvádzali všeobecné údaje o vhodnosti, resp. nevhodnosti určitého typu hlásiča na konkrétny druh požiaru, ale v dnešnej dobe existuje veľké množstvo výrobcov a konkrétnych typov hlásičov a uvedený všeobecný popis nemusí byť korektný pre každý typ hlásiča. Napriek tomu budú v ďalšej

časti uvedené odbornou verejnou všeobecne prijímané závery o vhodnosti rôznych druhov hlásičov.

Dymové hlásiče citlivé na optické vlastnosti dymu sa považujú za vhodné a veľmi rýchlo reagujúce na pomaly sa rozvíjajúce požiare uvoľňujúce veľké množstvo dymu (dnešné typy však dokážu spoľahlivo a rýchlo reagovať aj na rýchlo sa rozvíjajúce vnútorné požiare). Dymové hlásiče citlivé na absorpciu α častíc dymom dokážu rýchlo reagovať na pomaly sa rozvíjajúce požiare (uvoľňujúce veľké množstvo dymu) rovnako, ako na rýchlo sa rozvíjajúce požiare. Vo všeobecnosti sa dymové hlásiče považujú za relatívne náchylné na falošný poplach (v porovnaní s ostatnými typmi). Tento záver však už pre niektoré nové typy hlásičov nemusí platiť. V súčasnosti sú dymové senzory (či už v dymových alebo kombinovaných hlásičoch) najrozšírenejšie a chránia približne 70 až 90 % priestorov chránených elektrickou požiarou signalizáciou. Používajú sa takmer výlučne na ochranu vnútorných priestorov.

Teplotné hlásiče sú citlivé na nárast teploty počas požiaru. Zvyčajne reagujú pomalšie, ako ostatné druhy hlásičov, ale vykazujú mimoriadne vysokú odolnosť voči falošným poplachom. Používajú sa takmer výlučne na ochranu vnútorných priestorov.

Hlásiče infračerveného vyžarovania plameňa reagujú na elektromagnetické žiarenie s vlnovou dĺžkou typickou pre plameň (najčastejšie oxidu uhličitého a vodnej pary ohriate na teplotu plameňa). Používajú sa predovšetkým na detekciu požiaru (plameňa) vonkajších nádrží horľavých kvapalín. Pri správnom dimenzovaní reagujú na plameň veľmi rýchlo a môžu vykazovať vysokú odolnosť voči falošným poplachom (v závislosti od výrobcu).

Hlásiče založené na meraní koncentrácie oxidu uhoľnatého sú univerzálne (CO vzniká prakticky pri horení každej látky obsahujúcej uhlík – túto podmienku spĺňajú prakticky všetky organické látky), vykazujú vysokú rýchlosť reakcie a odolnosť voči falošným poplachom. V súčasnosti sú málo rozšírené (predovšetkým kvôli vysokej cene a nárokom na údržbu). Používajú sa takmer výlučne na ochranu vnútorných priestorov.

Kombinovaný hlásič je hlásič obsahujúci snímače snímajúce minimálne dva sprievodné javy požiaru. V súčasnosti sa najčastejšie používajú kombinované hlásiče pozostávajúce z dymového a teplotného senzora. V priestore v ktorom sa vyžaduje veľmi rýchla detekcia požiaru sa nastavujú tak, aby reagovali v prípade reakcie ktoréhokoľvek snímača. Naopak v priestore v ktorom je potrebná vysoká odolnosť voči falošným poplachom sa nastavujú tak, aby reagovali len v prípade reakcie oboch snímačov. V praxi sa najčastejšie stretávame s kombináciou uvedených dvoch krajných prípadov (napr. jeden senzor (dymový) musí zaznamenať minimálne 75 % intenzitu signálu potrebného na reakciu a druhý (teplotný) minimálne 25 % intenzitu signálu. Uvedené nastavenie závisí od požiadaviek na konkrétny priestor.

Ak sa nájde priestor z ktorého sa mohol rozšíriť sprievodný jav požiaru do iného priestoru a tam spôsobiť reakciu hlásiča je potrebné posúdiť či sa v tomto priestore nachádzajú stopy po vzniku požiaru a mechanizmus rozšírenia sa sprievodného javu požiaru od tohto priestoru až k hlásiču.

Ak sa potvrdí, že požiar vznikol v priestore chránenom hlásičom, ktorý reagoval ako prvý (napr. nájdu sa stopy po mieste vzniku požiaru) tak okrem času vzniku požiaru je (aspoň približne) zistené aj miesto (prípadne priestor) vzniku požiaru. Pri tomto postupe je však potrebné zachovať mimoriadne vysokú mieru opatrnosti a zohľadniť všetky faktory, ktoré môžu mať vplyv na reakciu konkrétneho hlásiča (napr. prúdenie vzduchu mohlo unášať dym a spôsobiť reakciu hlásiča, ktorý je od miesta vzniku požiaru relatívne vzdialený, aj keď sa nachádza v rovnakom priestore ako miesto vzniku požiaru).

Ak sa vyžaduje čo najpresnejšie stanovenie času vzniku požiaru, je potrebné zohľadniť aj reakčnú dobu hlásiča. V tomto prípade je potrebné vychádzať z technických parametrov konkrétneho hlásiča, druhu horiaceho materiálu a podmienok v mieste vzniku požiaru (napr. rýchlosť prúdenia vzduchu, výmena vzduchu a pod.). V prípade teplotného hlásiča (pri jeho známom nastavení) môže byť jeho reakčný čas odhadnutý na základe prenosu tepla prúdením (podkapitola 2.1.2) a dynamiky rozvoja požiaru v konkrétnom priestore (kapitola 6).

Reakčný čas kombinovaného hlásiča (dymovo-teplotného) od spoločnosti Siemens rady Sinteso FDOOT 241-9 pri jeho umiestnení vo výške 3, 5 a 7 m nad nádobou s rozmermi 33 x 33 x 5 cm naplnenou palivom tvoreným 1l: a) zmesou n-heptánu a toluénu (97:3), b) etanolu a c) riedidla S6006 znázorňuje tabuľka 8-1.

Tabuľka 8-1 Reakčný čas kombinovaného hlásiča Siemens Sinteso FDOOT 241-9

Palivo (-)	Výška hlásiča nad palivom (m)	Priemerný čas predpoplachu (s)	Priemerný čas poplachu (s)
n-heptán + toluén	3	22,97	30,81
	5	25,61	33,61
	7	50,61	59,88
Etanol	3	66,03	87,88
	5	101,16	> 480 ¹
	7	> 480 ¹	> 480 ¹
Riedidlo S6006	3	21,61	31,69
	5	26,16	34,03
	7	52,77	60,55

¹: k reakcii hlásiča nedošlo počas celej doby horenia paliva
Prameň: Ščipa (2012)

Vhodnosť vybraných druhov hlásičov na detekciu rôznych druhov požiarov posúdila aj spoločnosť Honeywell. Výsledky ilustruje tabuľka 8-2.

Tabuľka 8-2 Vhodnosť použitia vybraných druhov hlásičov elektrickej požiarnej signalizácie

Druh požiaru	Druh hlásiča					
	Opticko dymový	Termodiferenciálny	OT	O ² T	OTG	OT ^{blue}
Plameňový požiar celulózy	N	V	V	V	V	VH
Tlejúci požiar	VH	N	VH	VH	VH	VH
Súčasná tlenie a žeravenie	VH	N	VH	VH	VH	VH
Plameňový požiar plastov	V	V	V	VH	VH	VH
Požiar kvapaliny (n-heptán)	V	V	V	VH	VH	VH
Požiar kvapaliny (etanol)	N	VH	VH	VH	VH	VH
Požiar kvapaliny (dekalín dekahydronaftalén)	N	VH	VH	VH	VH	VH

N: nevhodný, V: vhodný, VH: veľmi vhodný, OT: opticko dymový detektor s infračerveným lúčom, O²T: opticko dymový detektor snímajúci priamy aj spätný rozptyl lúča, OTG: opticko dymový detektor s detektorom plynu (napr. CO), OT^{blue}: opticko dymový hlásič s modrým lúčom.

Prameň: Honeywell (2008)

Čas vzniku požiaru môže byť odhadnutý aj z hodín znefunkčnených následkom požiaru, ktoré umožňujú odčítanie času v okamihu ich zastavenia. Aj keď sa takýto prípad v praxi často nevyskytuje, za určitých okolností sa to môže stať. V tomto prípade však musia byť hodiny vyhotovené z dostatočne odolného materiálu, aby ich požiar úplne nezničil. Nakoľko v odbornej literatúre chýbajú údaje o teplote pri ktorých dochádza k zastaveniu chodu ručičkových hodín (napájaných z batérie) bol pre potrebu tejto publikácie vykonaný experiment. Na experiment boli použité hodinky GT Grand Touring, ktoré boli vložené do muflovej pece. V čase vloženia do pece bol na hodinkách nastavený čas 12:00. Počiatočná teplota pece (30 °C) sa zvyšovala rýchlosťou 1 °C.min⁻¹ až po hodnotu 330 °C. Po dosiahnutí tejto teploty boli hodinky z pece vybraté a na základe odčítaného času (približne 13:10) bola stanovená kritická teplota pri ktorej sa hodiny zastavili (približne 100 °C). Hodinky po termickom zatažení ilustruje obr. 8-1.

Uvedený experiment je však značne zjednodušený a má skôr edukačný charakter. Pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov v konkrétnom prípade je potrebné zobrať do úvahy všetky faktory, ktoré mohli mať vplyv na prenos tepla do hodín, čas ich funkčnosti a prípadný posun ručičiek počas konkrétneho požiaru (napr. umiestnenie vo vitríne, pád alebo posunutie ručičiek následkom roztavenia časti, ktorá bola s nimi v kontakte). A do úvahy je potrebné zobrať aj možnosť meškania, prípadne nadbiehania (následkom zvýšenej teploty) alebo nefunkčnosti hodín ešte pred vznikom požiaru, prípadne ich neprestavenie na letný čas.

Okrem vnútorných požiarov sa v praxi často stretávame s potrebou určiť čas vzniku požiaru automobilu (hlavne v prípade odcudzeného automobilu použitého na spáchanie trestného činu, ktorý úplne zhorel na odľahlom mieste a bol objavený s odstupom dní až týždňov). V tomto prípade je možné odhadnúť čas požiaru takéhoto automobilu na základe korózneho napadnutia (pri požiare sa znehodnotí povrchová úprava karosérie) a meteorologických záznamov v oblasti nálezu automobilu. Odhad času požiaru automobilu na základe korózneho napadnutia a meteorologických podmienok nerobí zisťovateľ príčin vzniku požiarov, ale súdny znalec z odboru materiálovej inžinierstva.



Obrázok 8-1 Hodiny po termickom zatažení na teplotu 330 °C s rýchlosťou ohrevu 1 °C.min⁻¹

Vo väčšine prípadov pri stanovení času vzniku požiaru majú väčší význam pamäťové, ako materiálne stopy. Na tomto mieste je však potrebné upozorniť, že výsluch (svedkov ako aj podozrivých) môžu vykonať len orgány činné v trestnom konaní. Preto príslušníci Hasičského a záchranného zboru MV SR, súdny znalci, súkromnými detektívi a ostatné osoby majú podstatne ťažšiu situáciu pri zisťovaní príčin vzniku požiarov. Príslušníci HaZZ MV SR môžu pri zisťovaní príčin vzniku požiarov vyžadovať informácie od právnických osôb a fyzických osôb-podnikateľov na základe § 5 písm. j) zákona č. 314/2001 Z. z.

Stanovenie presného času vzniku požiaru býva v praxi zložitú. Podstatne jednoduchšie je zistenie času ohlásenia požiaru. Podľa § 46 písm. c) zákona č. 314/2001 Z. z. je každá osoba povinná bez zbytočného odkladu ohlásiť požiar alebo zabezpečiť jeho uhasenie. Preto prvým exaktným časovým údajom pre zisťovateľa príčin vzniku požiarov je čas ohlásenia požiaru na tiesňovú linku 112 alebo na linku operačného strediska HaZZ (150), prípadne na operačné stredisko alebo pracovisko závodného hasičského útvaru. Hovory na linky 112 aj 150 sú nahrávané, vrátane zaznamenávania času ich prijatia. Druhý exaktný časový údaj je čas prjazdu hasičskej jednotky (každá hasičská jednotka je povinná hlásiť prjazd na miesto požiaru (resp. udalosti na ktorú bola vyslaná) na príslušné operačné stredisko alebo pracovisko.

Prvé spoľahlivé údaje o rozsahu požiaru získava zisťovateľ až na základe údajov zistených príslušníkmi hasičskej jednotky počas prieskumu. Tieto údaje by vo všeobecnosti mali byť považované za východiskové (nakolko sú to údaje získané od profesionálov v presne stanovenom čase). Z takto získaných údajov je vhodné do výkresov stavby zakresliť rozšírenie požiaru v čase vykonania prieskumu.

Ďalej je potrebné získať údaje od osoby, ktorá spozorovala požiar ako prvá. Predovšetkým je potrebné získať údaje o čase spozorovania a rozsahu požiaru v čase spozorovania, ako aj údaje o činnosti tejto osoby po zistení požiaru (napr. okamžitý telefonát na tiesňovú linku, okamžité nahlásenie požiaru na ohlasovňu požiarov, pokus o uhasenie požiaru, hľadanie hasiaceho prístroja a pod.).

Z takto získaných údajov je vhodné do výkresov stavby zakresliť rozšírenie požiaru v čase jeho spozorovania. Údaje získané od osoby, ktorá spozorovala požiar sú vždy bližšie k času vzniku požiaru, ako údaje od hasičskej jednotky v čase vykonania prieskumu. Z uvedeného vyplýva, že požiar je v čase jeho spozorovania bližšie k miestu jeho vzniku, ako v čase prieskumu hasičskej jednotky. Praktické využitie údajov o rozšírení požiaru v čase jeho spozorovania v sebe skrýva viacero úskalí, ktoré je pri zisťovaní príčin vzniku požiarov potrebné brať do úvahy. Medzi uvedené úškalia patrí:

- Osoba, ktorá spozorovala požiar ako prvá ho mohla buď úmyselne spôsobiť alebo požiar mohol vzniknúť následkom jej nedbalého konania. V takomto prípade sa bude snažiť skresliť fakty tak, aby sťažila alebo znemožnila odhalenie tejto skutočnosti.
- Osoba, ktorá spozorovala požiar ako prvá podá informáciu len o rozšírení požiaru v mieste kde ho spozorovala (nemá údaje o rozšírení požiaru v ostatných častiach stavby).
- Osoba, ktorá spozorovala požiar ako prvá nevie určiť presne čas spozorovania (v čase spozorovania sa nepozrela na hodiny). Čas spozorovania môže odhadnúť spätne na základe subjektívnych pocitov, ktoré môžu byť zdrojom zásadných nepresností (osoba, ktorej blízka osoba je ohrozená na živote alebo ktorej majetok je vystavený bezprostrednej hrozbe je náchylná vnímať čas rýchlejšie – napr. po dvoch minútach od tiesňového volania má pocit, že ubehla jedna hodina a pod.).

- Osoba, ktorá spozorovala požiar ako prvá môže mať vplyvom nedostatku odborných vedomostí a praktických skúseností (v absolútnej väčšine prípadov spozoruje požiar ako prvý laik) sklon buď k zveličovaniu rozsahu požiaru alebo naopak k jeho podceňovaniu. Pri podcenení často dochádza k snahe uhasiť požiar, ktorý sa bez zásahu hasičskej jednotky uhasiť nedá. Pri neúspešnej snahe uhasiť požiar môže uvádzať neskorší čas spozorovania požiaru aby tak zakryla neúspešný pokus o uhasenie. Pri indíciách vedúcich k tejto skutočnosti je potrebné osobu ubezpečiť, že pokusom o uhasenie požiaru konala plne v súlade s platnou legislatívou a nehrozí jej za to žiadny postih.

Vo väčšine prípadov dokážu pamäťové stopy zúžiť plochu požiaru na ktorej sa mohlo nachádzať potenciálne miesto vzniku požiaru, ale nedokážu ho presne vymedziť. Pre identifikáciu miesta vzniku požiaru sú preto veľmi dôležité materiálne stopy. Dokonca v prípadoch, keď je miesto vzniku požiaru možné presne identifikovať na základe pamäťových stôp, je potrebné toto overiť na základe materiálových stôp. Dôvodom je jednak možnosť súčasného (resp. počas krátkeho časového intervalu) vzniku požiaru na viacerých miestach (indikuje úmyselné založenie požiaru), ale aj fakt, že osoba, ktorá spozorovala požiar ako prvá ho mohla úmyselne spôsobiť, prípadne zanedbať povinnosti následkom ktorého požiar vznikol. Takéto osoby majú tendenciu skresľovať skutočnosť vo svoj prospech.

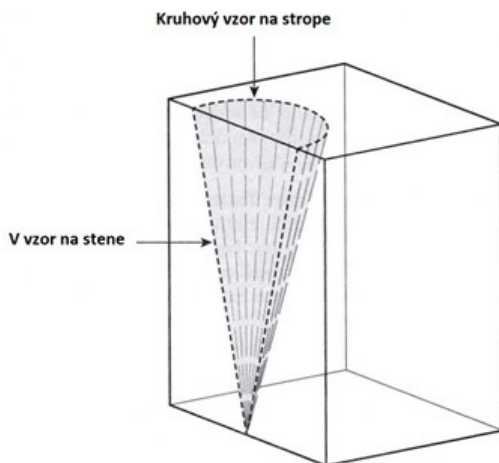
Vznik charakteristických stôp po požiaroch má tri základné príčiny: teplo (uvolnené pri požiaroch, ukládanie (nánosy) a spotrebovanie (úbytok hmotnosti horľavých látok). Systematická analýza stôp po požiaroch umožňuje zistenie tepelného zdroja, ktorý ich spôsobil (NFPA 921:2014).

Kľúčovými materiálovými stopami pre zistenie miesta vzniku požiaru sú **stopy vytvárané stúpajúcimi splodinami horenia z lokálneho požiaru**.

Vzory stôp vytvárané stúpajúcimi splodinami horenia po požiaroch vytvárajú priamo stúpajúce splodiny horenia vo forme trojrozmerných stôp. Stopy horenia reprezentujú demarkačné línie, ktoré vyznačujú účinky požiaru na materiáli. Keď stúpajúce splodiny prídu do kontaktu s povrchom vyvolávajú účinky, ktoré sú interpretované ako vzory (kuželovité rezy). Tieto stopy môžu mať vzor (NFPA 921:2014):

- písmena V,
- obráteného kužela (písmena A),
- presýpacích hodín,
- písmena U
- tvaru šípky,
- kruhu.

Stopy tvaru písmena V na zvislých povrchoch vznikajú pôsobením plameňov, tepelného prúdenia alebo žiarenia z horúcich splodín horenia alebo dymu (v zostupnom prúde splodín horenia). Stopy tvaru písmena V sa často javia ako demarkačné línie (obr. 8-2), ktoré ohraničujú okraje účinkov požiaru (NFPA 921:2014).

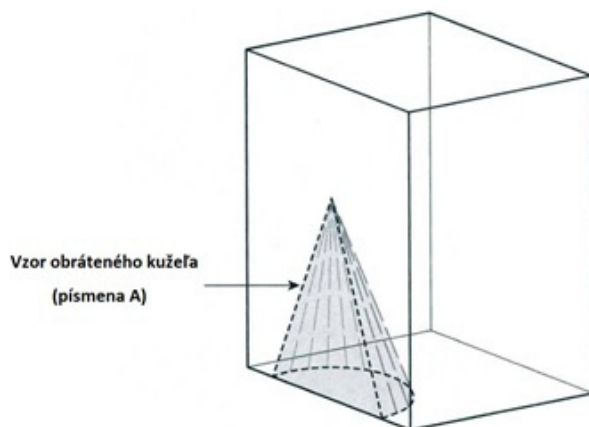


Obrázok 8-2 Vzor písmena V na stene a kruhový vzor na strope (NFPA 921:2014)

Vzor obráteného kužela často vzniká vplyvom vertikálneho prúdu splodín horenia, ktorý nedosahuje po strop. Charakteristický dvojrozmerný tvar je trojuholník so základňou na spondej strane (obr. 8-3) (NFPA 921:2014).

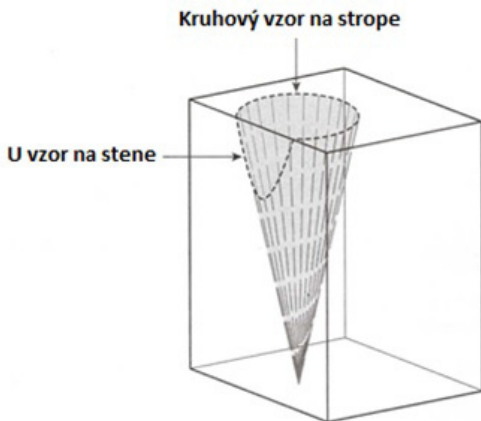
Vzory obráteného kužela vznikajú pri krátkotrvajúcich požiaroch alebo požiaroch s nízkou rýchlosťou uvoľňovania tepla, ktoré sa plne nerozvinuli na plamene od podlahy po stop alebo majú plamene neobmedzené vo vertikálnej rovine (NFPA 921:2014).

Vzostupný prúd splodín horenia je tvorený zónou horúcich plynov tvaru písmena V a zónou plameňov na svojej základni. Zóna plameňov má tvar obráteného písmena V. Keď sa zóna horúcich plynov stretne s vertikálnym povrchom, vzniká typický vzor stopy tvaru písmena V. Ak je samotný požiar veľmi blízko steny alebo je s ňou v kontakte, výsledný vzor bude vykazovať rovnako vrstvy horúcich plynov, ako aj zóny plameňov (veľké V nad obráteným V). Obrátené V je zvyčajne menšie a môže vykazovať intenzívnejšie horenie alebo vyhorenie dočista. Celkový vzor, ktorý takto vznikne sa nazýva presýpacie hodiny (NFPA 921:2014).



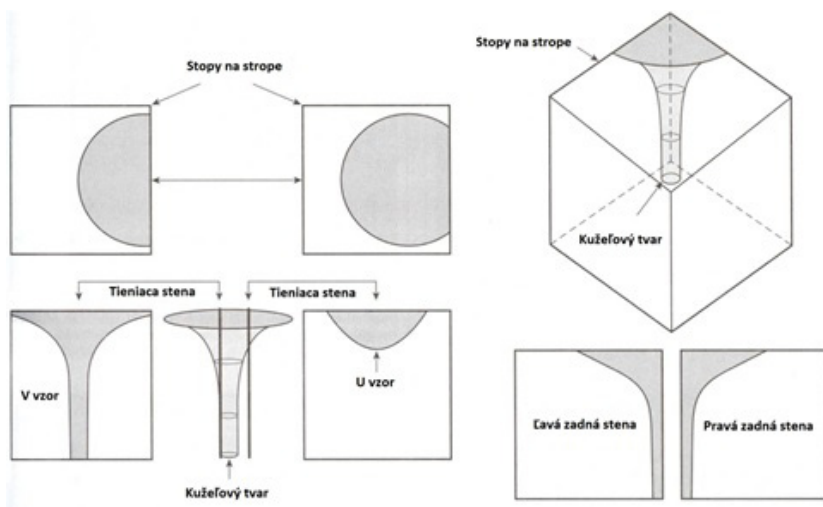
Obrázok 8-3 Vzor obráteného kužela (písmena A) (NFPA 921:2014)

Vzory písmena U sú podobné stopám typu písmena V, ale majú mierne zaoblené demarkačné línie a tiež vrcholy sú skôr zaoblené než vytvárajú uhol (obr. 8-4). Najnižšie demarkačné línie stôp tvaru U sú zvyčajne vyššie oproti nižším demarkačným čiaram stôp tvaru V, ktoré sú bližšie k zdroju tepla (lokálnemu požiaru) (NFPA 921:2014).



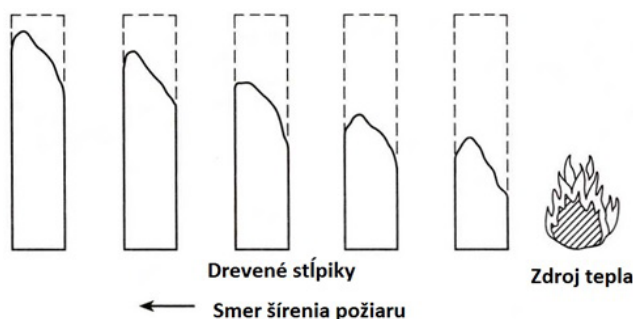
Obrázok 8-4 U vzor na stene (NFPA 921:2014)

Stopy zrezaného kužeľa, označované aj ako zrezané stopy prúdiacich splodín horenia, sú trojrozmerné stopy po požari, zobrazené súčasne na vodorovných aj zvislých plochách (obr. 8-5). Tieto stopy sa zobrazujú na priesekoch horizontálnych a vertikálnych plôch, kde prúdiace splodiny horenia vytvárajú stopy tvaru kužeľa alebo presýpacích hodín. Mnohé stopy horenia, ako sú V-stopy, U-stopy, kruhové stopy a stopy tvaru šípky sú v priamom súvisi s trojrozmerným kužeľom tepla, ktorý vzniká pri požari (NFPA 921:2014).



Obrázok 8-5 Ideálne vzory stôp zrezaného kužeľa (NFPA 921:2014)

Vzory ukazovateľov smeru a šípkok sa môžu nachádzať na sérii horľavých prvkov ako sú drevené nástenné stĺpik/dosky, ktorých povrchovú úpravu zničil požiar. Smer šírenia požiaru pri stene sa dá často identifikovať a vystopovať späť ku svojmu zdroju tak, že preskúmame pomernú výšku a odhorené tvary dosiek, ako zostali po požiari. Všeobecne platí, že kratšie a viac zuhoľnatené drevené dosky boli bližšie k zdroju tepla, než vyššie stĺpiky. Výška zvyškov drevených stĺpikov narastá úmerne vzdialenosti od zdroja horenia. Potrebne je zdokumentovať rozdiely vo výške a intenzite zuhoľnatenia, ako je zobrazené na obr. 8-6 (NFPA 921:2014).



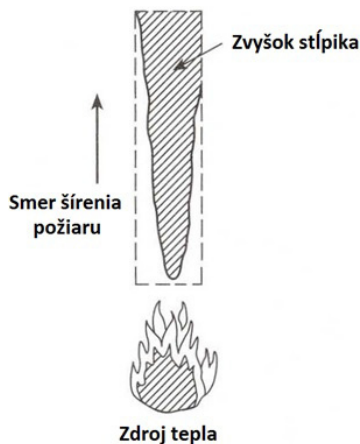
Obrázok 8-6 Drevené stĺpiky pri stene, na ktorých vidno pokles rozsahu poškodenia s narastajúcou vzdialenosťou od zdroja požiaru (NFPA 921:2014)

Tvar prierezu drevených stĺpikov bude mať tendenciu vytvárať šípky smerujúce k priestoru s tepelným zdrojom. Je to spôsobené odhorením ostrých rohov z hrán drevených stĺpikov na stranách smerujúcich k tepelnému zdroju, ktorý toto zapríčinil (obr. 8-7) (NFPA 921:2014).

Vzory stôp na spodnej strane vodorovných povrchov ako sú stropy, dosky stola a police v regáloch, môžu mať približne kruhový tvar. Čím je zdroj tepla (lokálny požiar) ďalej od steny, tým má daný vzor výraznejšie kruhový tvar. Časti kruhových vzorov môžu byť zobrazené na spodnej strane objektov, ktoré čiastočne blokujú vzostupný prúd horúcich plynov. Toto sa môže stať vtedy, ak hrana povrchu, na ktorom sa zobrazuje vzor stopy, nedosahuje dosť ďaleko na to, aby sa na nej mohol zobrazit kompletný kruhový tvar alebo keď je hrana povrchu tesne pri stene. V kruhovej stope môže byť v strede vidno väčšiu tepelnú degradáciu (napr. hlbšie zuhoľnatenie). Keď zisťovateľ lokalizuje stred kruhového vzoru, bezprostredne pod ním môže nájsť dôležitý záchytný bod ku zdroju najväčšieho tepla (NFPA 921:2014).

Uvedené vzory stôp sú typické pre lokálny požiar (pred etapou flashover). Na ich základe je v mnohých prípadoch možné identifikovať miesto vzniku požiaru. Tieto stopy však môžu byť zničené tzv. vyhorením dočista, ktoré môže nastať pri priamom kontakte plameňa s vyššie uvedenými vzormi stôp alebo vo fáze post-flashover (vo fáze plne rozvinutého požiaru).

Okrem stôp vytváraných stúpajúcimi sploďinami horenia môže byť miesto vzniku požiaru identifikované na základe **stôp na technickom zariadení, ktoré bolo príčinou vzniku požiaru**. V prípade, že bol požiar spôsobený technickým zariadením, je možné miesto požiaru často identifikovať prostredníctvom stôp vytvorených stúpajúcimi sploďinami horenia z lokálneho požiaru a následne miesto vzniku požiaru a jeho príčinu potvrdiť na základe stôp na technickom zariadení. Z technických zariadení býva najčastejšou príčinou vzniku požiarov elektroinštalácia (tak ako je definovaná v podkapitole 2.3.3).



Obrázok 8-7 Prierez drevenej nástennej dosky, ktorej zúžený koniec smeruje k zdroju tepla (NFPA 921:2014)

Aj keď skrat nebýva častou príčinou vzniku požiaru jeho vznik môže byť (predovšetkým v občianskych stavbách) veľmi ľahko identifikovateľný, preto je pri hľadaní stôp na elektroinštalácii vhodné začať práve týmto poruchovým stavom. Prvou indíciou skratu je vypnutý istič v rozvádzači. Príčinou vypnutia ističa mohol byť skrat alebo preťaženie (v tomto prípade bude s vysokou pravdepodobnosťou vypnutý len jeden istič – nie hlavný) alebo vypnutie členom protipožiarnej hliadky, prípadne hasičmi po vzniku požiaru (v tomto prípade bude s vysokou pravdepodobnosťou vypnutých viac ističov alebo ak sa v stavbe nenachádzajú zariadenia, ktoré musia zostať funkčné počas požiaru tak môže byť vypnutý hlavný istič). V súčasnosti síce neexistuje žiadna vedecká metóda na základ ktorej by sa dalo zistiť (s relatívne veľkým odstupom času) či istič reagoval na preťaženie alebo skrat. Na druhej strane je však veľmi jednoducho možné zistiť, či bol istič vypnutý ručne alebo samočinne reagoval na skrat alebo preťaženie. Prvou indíciou skratu je teda jeden alebo viac ističov vypnutých samočinne. Ak sú vypnuté všetky ističe ručne, je potrebné získať informácie od osoby, ktorá ich vypínala, či nebol jeden alebo viac ističov v čase vypínania vypnutých samočinne. Na tomto mieste je však potrebné upozorniť, že osoba, ktorá ističe vypínala to nemusí vedieť, nakoľko mohla konať pod stresom a v časovej tiesni a nemusela si všimnúť indikáciu samočinnnej reakcie ističa. Ak sa však zistí, že bol jeden alebo viac ističov vypnutých samočinne je potrebné nájsť miesto skratu. Miesto skratu sa obvyčajne vyznačuje roztavenou časťou na elektroinštalácii (napr. na medenom vodiči). Miesto skratu je potrebné hľadať aj v prípade, že sa elektrické zariadenie nachádza na predpokladanom mieste vzniku požiaru, aj keď nie je v rozvádzači samočinne vypnutý istič (príčinou môže byť, že istič niekto po samočinnom vplynutí manuálne zapol).

Ak sa v predpokladanom mieste vzniku požiaru nájde skrat, tento nemôže byť automaticky považovaný za príčinu vzniku požiaru. V oblasti zisťovania príčin vzniku požiaru sa skraty delia na primárne (príčinné) a sekundárne. Primárny skrat je skrat ktorý bol príčinou vzniku požiaru. Sekundárny skrat je skrat, ktorý vznikol následkom tepelného pôsobenia požiaru (napr. roztavenie izolácie) na elektroinštaláciu. V prípade medených vodičov existujú exaktné vedecké metódy na posúdenie či bol skrat primárny alebo sekundárny. V prípade hliníkových vodičov na základe súčasnej úrovne vedy a techniky nie je s dostatočnou spoľahlivosťou možné zistiť, či je skrat primárny alebo sekundárny.

V natavených častiach medených vodičov je možné hodnotiť viac parametrov na základe ktorých je možné rozlíšiť primárny a sekundárny skrat. Jedná sa hlavne o nasledujúce parametre (Dvořák a kol. 2006, Dvořák a kol. 2008 a Dvořák a kol. 2011):

- kontaminácia natavených častí produktmi rozkladu elektrickej izolácie,
- obsah kyslíka v natavenej časti,
- vzdialenosť vetiev dendritov Cu v natavenej časti,
- vzdialenosť Cu zŕn v natavenej časti,
- veľkosť rekryštalizovaných zŕn v okolí natavenej časti,
- počet a veľkosť pórov v natavenej časti.

Uvedený teoretický rozbor dokazuje, že pre rozlíšenie medzi primárnym a sekundárnym skratom je možné využiť viacero štruktúrnych parametrov natavených častí. Tieto parametre je možné hodnotiť pomocou bežných analytických metód (napr. svetelná mikroskopia alebo chemická mikroanalýza). Je však potrebné zdôrazniť, že všetky uvedené parametre je nutné posudzovať spoločne. Okrem toho je dôležité pri rozbere natavenej časti dôkladne zohľadniť podmienky požiaru.

V obvodoch chránených istiacimi prístrojmi (poistkou alebo ističom) dokáže elektrický skrat iniciovať vo väčšine prípadov len horľavý súbor tvorený zmesou horľavého plynu alebo pary horľavej kvapaliny, prípadne rozvíreného prachu a vzduchu. V týchto obvodoch vznikne v prípade skratu len relatívne malá roztavená časť elektroinštalácie. Iná situácia je v obvodoch, ktoré nie sú chránené istiacim prístrojom (typickým príkladom je obvod štartéra automobilu) alebo sú chránené len jedným istiacim prístrojom (typickým príkladom je väčšina elektrických obvodov v automobile). Ak v takomto obvode dôjde k poruche istiaceho prístroja (typickým príkladom je nahradenie tavného článku poistky vodičom s podstatne väčším prierezom – tzv. „oprava poistky“) môže dôjsť k situácii, že istiaci prvok nedokáže chrániť odvod pred skratovým prúdom. V tomto prípade by pri vzniku skratu pretekal obvodom skratový prúd limitovaný len veľkosťou elektrického odporu skratového obvodu (limituje veľkosť prúdu) a kapacitou batérie (spolu s veľkosťou prúdu limituje čas pretekania skratového prúdu). V prípade takýchto obvodov môže vzniknúť viac miest skratu (teplo uvoľňované následkom skratu taví izoláciu vodičov). V tomto prípade platí zásada, že miesto prvého skratu je miesto najvzdialenejšie od zdroja elektrického napätia (autobatérie) (tento záver vyplýva z faktu, že elektrický prúd tečie vždy cez miesto najnižšieho odporu).

Podstatne častejšou príčinou vzniku požiaru od elektroinštalácie (v porovnaní so skratom) je zvýšený prechodový odpor. V súčasnosti prevláda medzi odbornou verejnosťou v Slovenskej republike, resp. všeobecne v Strednej Európe názor, že stopy po zvýšenom prechodovom odpore zničí požiar. Tento názor však nie je celkom korektný a často je možné stopy po zvýšenom prechodovom odpore nájsť aj v elektroinštalácii exponovanej požiarom. Tento záver vyplýva z NFPA 921:2014 podľa ktorej sú kovy v mieste zvýšeného prechodového odporu zoxidované viac, ako rovnaké kovy exponované požiarom. Túto skutočnosť ilustruje obr. 8-8. V prípade expozície požiarom zariadenia na obr. 8-8 by s vysokou mierou pravdepodobnosti bolo možné rozoznať, že zoxidovaný spoj (pred požiarom) je viac zoxidovaný ako ostatné spoje exponované požiarom.

Stopy uvádzané v nasledovných dvoch podkapitolách primárne indikujú smer šírenia a intenzitu požiaru, ale často nachádzajú využitie aj pri zistení (alebo potvrdení) miesta a prípadne aj príčiny vzniku požiaru.



Obrázok 8-8 Zoxidovaný kov v mieste zvýšeného prechodového odporu (NFPA 921:2014)

8.2.2. Stopy indikujúce smer šírenia požiaru

Stopy indikujúce smer šírenia požiaru predstavujú druhú dôležitú skupinu stôp po požiaroch. Uvedené stopy umožňujú na jednej strane rekonštrukciu priebehu požiaru, na strane druhej je na ich základe možné overiť miesto vzniku požiaru.

Dôležitou stopou po požiaroch, na základe ktorej je možné určiť smer šírenia požiaru, je **hĺbka zuhoľnatenia**, predovšetkým dreva, ale aj iných materiálov so sklonom vytvárať na svojom povrchu tuhú zuhoľnatú vrstvu.

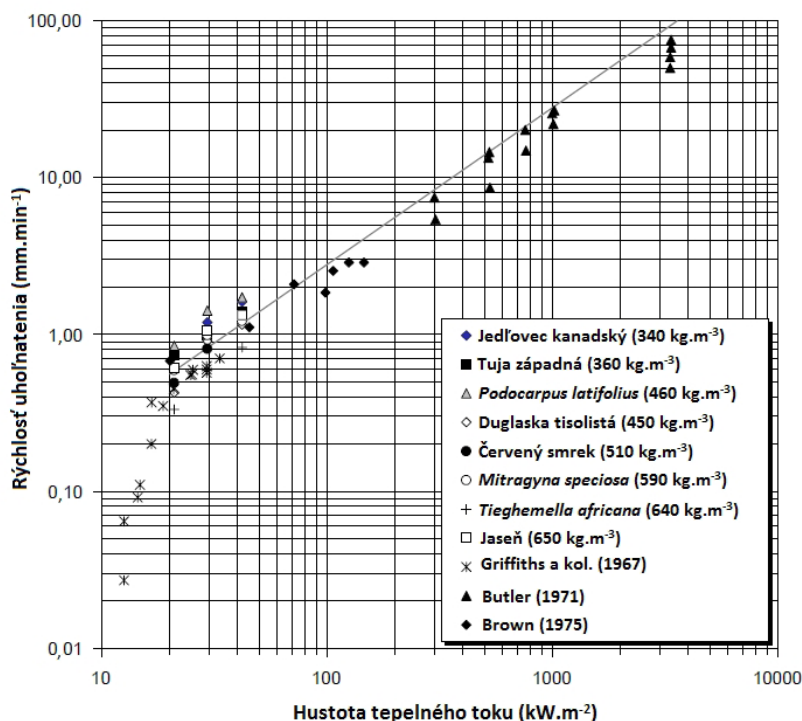
Pri praktickej aplikácii rýchlosti uhoľnatenia a hĺbky zuhoľnatia dreva je podľa NFPA 921:2014 potrebné vchádzať z relatívnej hĺbky zuhoľnatia (porovnať hĺbku zuhoľnatia na viacerých miestach) a nie zo samotnej hĺbky zuhoľnatia (rýchlosti uhoľnatia). Dôvodom je skutočnosť, že korelácia rýchlosti uhoľnatia dreva 2,54 cm za 45 minút platí pre požiar riadený odvetraním. Za podmienok reálneho požiaru sa rýchlosť uhoľnatia dreva môže meniť od 1 cm až po 25,4 cm za hodinu (v závislosti od intenzity požiaru). Preto hĺbka zuhoľnatia nemôže byť použitá ako jediný indikátor doby trvania požiaru (NFPA 921:2014).

Rýchlosť uhoľnatia dreva je variabilná a závisí od viacerých faktorov. Medzi najvýznamnejšie patrí (NFPA 921:2014):

- rýchlosť a čas trvania zahrievania,
- vplyv vetrania,
- pomer plochy povrchu k hmotnosti,
- smer, orientácia a veľkosť jadra v dreve,
- druh dreviny,
- hustota dreva,

- vlhkosť dreva,
- vlastnosti povrchového náteru,
- koncentrácia kyslíka v horúcich plynoch,
- rýchlosť prúdenia plynov,
- vplyv medzier, trhlín, škár a hrán.

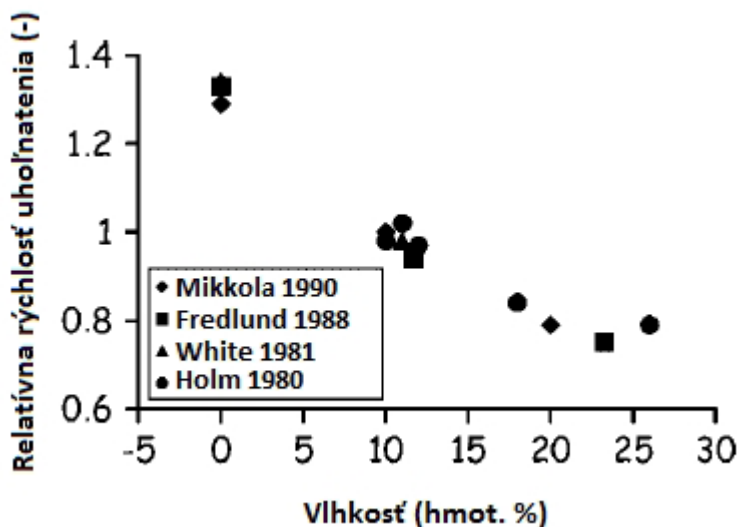
Závislosť rýchlosti uhoľnatenia od hustoty tepelného toku pre rôzne druhy drevín ilustruje obr. 8-9. Závislosť rýchlosti uhoľnatenia dreva od jeho vlhkosti ilustruje obr. 8-10.



Obrázok 8-9 Závislosť rýchlosti uhoľnatenia dreva od hustoty tepelného toku pre rôzne dreviny (Babrauskas 2005)

Analýza hĺbky zuhoľnatenia je spoľahlivejšia pre hodnotenie šírenia požiaru ako pre stanovenie špecifického času alebo intenzity horenia materiálov. Relatívna hĺbka zuhoľnatenia medzi rôznymi bodmi je kľúčová pre určenie miest s najväčším poškodením v dôsledku expozície, odvetrania alebo umiestnenia paliva. Zisťovateľ príčin vzniku požiarov môže potom dedukovať smer šírenia požiaru s klesajúcou hĺbkou zuhoľnatenia od tepelného zdroja (NFPA 921:2014).

Ďalšia dôležitá stopa pre určenie smeru šírenia požiaru je **tavenie materiálov**. Príklad využitia tavenia materiálov na stanovenie smeru šírenia požiaru ilustruje obr. 8-11.



Obrázok 8-10 Závislosť rýchlosti uhoľnatenia dreva od jeho vlhkosti (Mikkola 1990, Friquin 2011)



Obrázok 8-11 Roztavené svetidlo indikuje smer šírenia tepla (NFPA 921:2014)

Smer šírenia požiaru môžu indikovať aj žiarovky a žiarivky. Ak je v žiarovke alebo žiarivke dost' plynu na vytvorenie vnútorného pretlaku (obvyčajne žiarovky s príkonom nad 25 W) tak sa tieto plyny následkom pôsobiaceho tepla začnú rozpínať a vybublú zo zmäknutého skla v smere dopadajúceho tepelného toku (obr. 8-12). Naopak žiarovky s príkonom menším ako 25 W môžu byť vtiahnuté do vnútra zo strany od ktorej na ne pôsobilo teplo (obr. 8-13).



Obrázok 8-12 Smer vytiahnutia žiarovky (s príkonom nad 25 W) indikuje smer dopadajúceho tepelného toku (NFPA 921:2008)



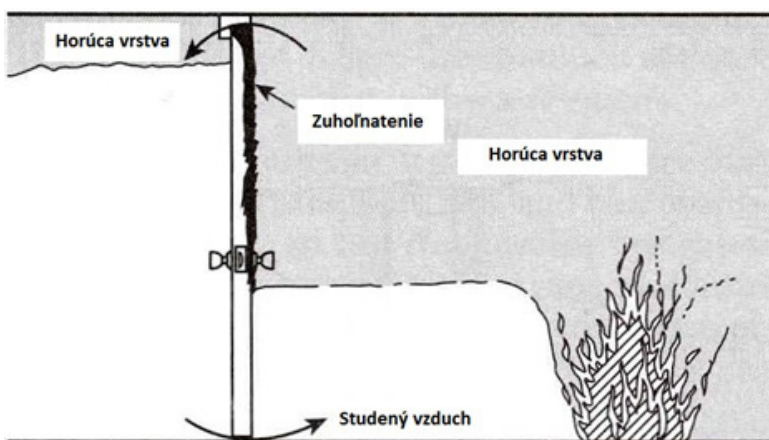
Obrázok 8-13 Smer preliačenia žiarovky (s príkonom do 25 W) indikuje smer dopadajúceho tepelného toku (NFPA 921:2014)

Ďalšou stopou umožňujúcou stanovenie smeru šírenia požiaru sú **nánosy dymových častíc na povrchoch**.

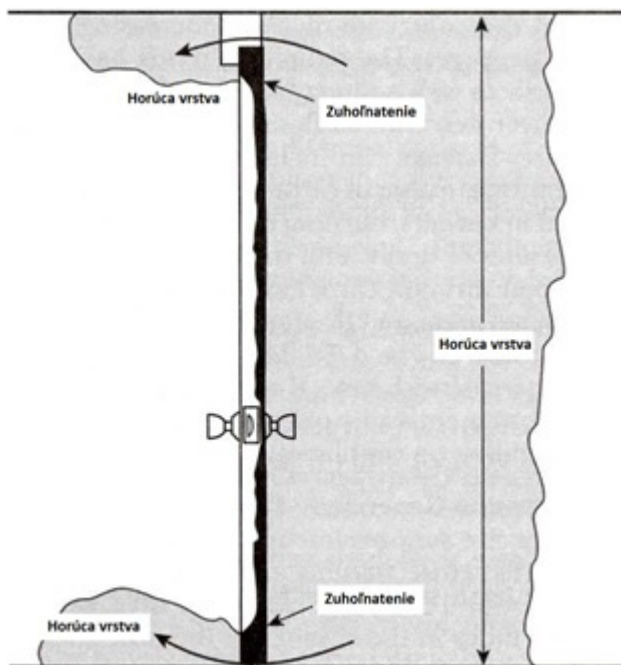
Dymové častice sa sústreďujú na chladnejších povrchoch stavby alebo jej zariadení, často na horných častiach stien v miestnostiach susediacich s miestnosťou, kde prebieha požiar. Dym, hlavne z tlejúcich požiarov má tendenciu kondenzovať na stenách, oknách a iných chladnejších povrchoch (NFPA 921:2014).

Poslednou významnou stopu indikujúcou smer šírenia požiaru sú **stopy vytvorené vetraním**.

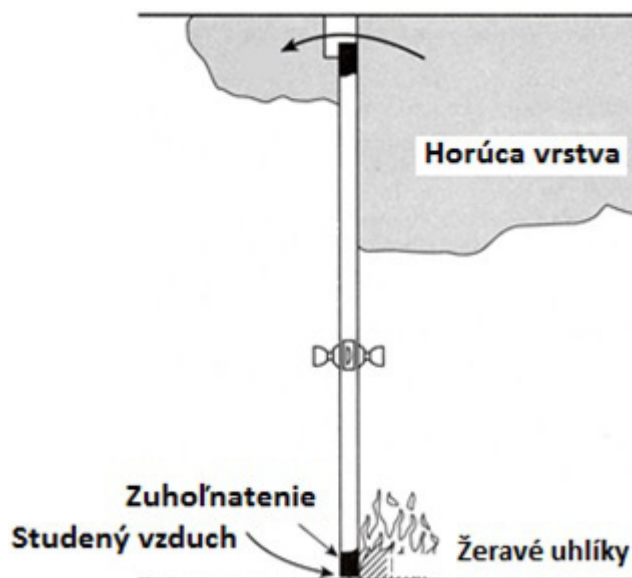
Keď sú v horiacej miestnosti zatvorené dvere, horúce plyny môžu unikáť cez škáry v hornej časti zatvorených dverí, následkom čoho dochádza k uhoľnateniu tejto časti dverí. Chladný vzduch môže do miestnosti vnikáť cez škáry v dolnej časti dverí (obr. 8-14). V prípade plne rozvinutého požiaru môžu horúce plyny klesnúť až na podlahu a unikáť aj cez škáry pod dverami a spôsobovať tam zuhoľnatenie (obr. 8-15). K zuhoľnateniu môže dôjsť aj vtedy, ak žeravé trosky dopadnú pred dvere z vonkajšej alebo vnútornej strany (obr. 8-16) (NFPA 921:2014).



Obrázok 8-14 Prúdenie vzduchu okolo dverí (NFPA 921:2014)



Obrázok 8-15 Horúce plyny prúdiace popod dvere a následné zuhoľnatenie dolnej časti dverí (NFPA 921:2014)



Obrázok 8-16 Zuhoľnatie v spodnej časti dverí spôsobené žeravými uhlíkmi (NFPA 921:2014)

8.2.3.

Stopy indikujúce intenzitu požiaru

Intenzita požiaru môže byť odhadnutá na základe viacerých zmien na materiáloch nachádzajúcich sa v priestore vzniku požiaru. V mnohých prípadoch nie je ani tak dôležitá celková intenzita požiaru, ako zmena intenzity požiaru (horenia) v priestore alebo požiarom úseku zasiahnutom požiarom. Na tomto mieste je potrebné upozorniť, že miesto najintenzívnejšieho horenia môže, ale nemusí byť totožné s miestom vzniku požiaru. Ak je požiarne zaťaženie v rámci priestoru (požiarneho úseku) rozložené rovnomerne je pravdepodobné, že miesto najintenzívnejšieho horenia (miesto s najväčším poškodením) je totožné s miestom vzniku požiaru. Pre aplikáciu tohto pravidla je však potrebné zohľadniť aj vlastnosti konštrukcií a možnosti odvetrania požiarneho úseku počas požiaru. Toto pravidlo sa dá aplikovať len v prípade, že konštrukcie požiarneho úseku majú porovnateľnú požiaru odolnosť (ak má jedna konštrukcia napr. dvojnásobnú požiaru odolnosť v porovnaní s inou, je možné očakávať nižší stupeň poškodenia aj v prípade, že bola vystavená požiaru s vyššou intenzitou). Podobný vplyv na intenzitu požiaru (a následné poškodenie) má odvetranie požiarneho úseku.

Intenzita požiaru (jej relatívna hodnota) sa často využíva pri stanovení smeru šírenia a miesta vzniku požiaru.

Z NFPA 921:2014 vyplýva, že intenzita požiaru môže byť odhadnutá z:

- roztavenia materiálov v požiarom úseku a príslušných priestoroch,
- tepelného rozpínania a deformácie materiálov,
- farebných zmien,
- kalcinácie,
- kolapsu nábytkárskych pružín.

Mnoho tuhých materiálov sa pri zvýšených teplotách taví alebo mäkne v rozsahu od mierneho zvýšenia izbovej teploty až po tisícky stupňov Celzia. Pre každý materiál je charakteristická špecifická teplota alebo rozsah teplôt tavenia. Teploty tavenia bežných používaných kovov sa pohybujú od 170 °C (kovy na spájkovanie) až do 1460 °C (ocel). Termoplasty mäknú a tavia sa v rozsahu relatívne nízkych teplôt od asi 75 °C po takmer 400 °C (NFPA 921:2014).

Na základe laboratórneho stanovenia teploty tavenia roztavených častí (predovšetkým kovov) v požiarom úseku (alebo príslušných častiach) je možné odhadnúť teplotu v požiarom úseku počas požiaru. Pri odhade teploty je korektnější postup stanovenie teploty tavenia konkrétneho roztaveného materiálu, ako použitie tabuľkových hodnôt, nakoľko zistovateľ príčin vzniku požiaru z vizuálneho pozorovania nedokáže určiť presné chemické zloženie roztaveného kovu alebo plastu (a teda aj použitie tabuľkových údajov je v tomto prípade komplikované).

Počas požiaru môže kov s pomerne nízkym bodom tavenia sa roztaviť a dostať do kontaktu s inými kovmi, ktorých bod tavenia presahuje dosiahnuté teploty. Ak sa kov s nízkou teplotou tavenia (napr. zinok) dostane do povrchového kontaktu s kovom s vyššou teplotou tavenia (napr. meď), oba kovy sa zmiešajú a vytvoria zliatinu zinku a medi (mosadz) s nižšou teplotou tavenia ako má meď (NFPA 921:2014).

Takmer všetky bežné materiály sa pri zahrievaní rozpínajú. Tento jav môže ovplyvniť celistvosť pevných konštrukcií, ak sú zhotovené z rôznych materiálov. Ak sa jeden materiál rozptína viac, ako iný v rámci konštrukcie, rozdielnosť rozpínania môže spôsobiť kolaps konštrukcie (NFPA 921:2014).

Ohybanie a deformovanie ocelových trémov nastáva vtedy, keď teplota ocele presahuje približne 500 °C. Ocel pri zvýšených teplotách progresívne stráca pevnosť. Pri vyššej expozícii požiaru stačí na spôsobenie deformácie nižšie zaťaženie. Deformácia nie je spôsobená tavením. Deformovaný prvok nie je taký, ktorý sa počas požiaru tavil a preto výskyt takej deformácie neindikuje, že materiál bol zahriaty nad svoju teplotu tavenia. Naopak, deformovaný prvok na rozdiel od roztaveného indikuje, že teplota materiálu nepresiahla jeho bod tavenia. Pri deformácii nosníka ohybom môže zohrať úlohu aj tepelné rozpínanie, ak sú kovové časti votknuté (NFPA 921:2014).

Farebné zmeny materiálov počas požiaru súvisia s oxidáciou ich povrchu. Zo samotnej zmeny farby nie je možné späť stanoviť teplotu na ktorú bol materiál počas požiaru zahriaty (nižšia teplota môže vyvolať za dlhší čas rovnaký účinok, ako vyššia teplota za kratší čas a okrem toho je vnímanie farby do značnej miery individuálne). Tieto zmeny je však možné využiť na určenie miest v požiarom úseku (priestore zasiahnutom požiarom) v ktorom boli dosiahnuté vyššie teploty ako v iných miestach toho istého priestoru (podobné myšlienky uvádza NFPA 921:2014).

Keď železo alebo ocel bez povrchovej úpravy oxiduje pri požiaroch, povrch získava najskôr modrosivý matný odtieň. Pri vyšších teplotách sa môže ocel zoxidovať na čierne oxidy. Silne zoxidovaná ocel môže vykazovať vizuálny vzhľad podobný taveniu. Často sa stáva, že vizuálne sa nedá určiť, či sa ocel roztavila alebo je iba silne zoxidovaná. Posúdenie či bola ocel počas požiaru roztavená sa vykonáva prostredníctvom metalografie (NFPA 921:2014).

Termín kalcinácia sa používa na vyjadrenie radu zmien, ktoré prebiehajú v omietnutých alebo sadrokartónových povrchoch stien pri požiaroch. Kalcinácia stien so sadrovou omietkou zahŕňa zbavenie sadry voľnej a chemicky viazanej vody (dehydratácia), ako aj ďalšie chemické a fyzikálne zmeny sadrových komponentov. Kalcinácia zahŕňa chemickú zmenu sadry na anhydrit. Kalcinovaná sadrokartónová stena má menšiu hustotu ako

nekalcinovaný sadrokartón. Čím hlbšie zasiahne kalcinácia do stenovej dosky, tým väčšia bola celková tepelná expozícia (hustota tepelného toku a jeho trvanie) (NFPA 921:2014).

Strata pružnosti nábytkárskych pružín môže zisťovateľovi poskytnúť určité záchytné body týkajúce sa smeru, trvania a intenzity požiaru. Tento kolaps sa však nedá použiť ako indikátor expozície špecifickému tepelnému zdroju, ako je horenie tlením alebo použitie horľavej kvapaliny. Výsledky laboratórnych skúšok preukázali, že žihanie pružín a s tým spojená strata napätia pružiny závisia výlučne od aplikácie tepla. Dokázalo sa, že krátkodobé zahrievanie pri vysokých teplotách, rovnako ako dlhodobé zahrievanie pri miernejších teplotách (nad 400 °C) môže spôsobiť stratu pevnosti v ťahu a tým kolaps pružín čalúneného nábytku. Ďalej sa dokázalo, že zaťaženie pružín v čase zahrievania zvyšuje stratu ich napätia (NFPA 921:2014).

Pri analyzovaní nábytkárskych pružín sa porovnávajú rozdiely medzi pružinami na rôznych miestach v matracoch, poduškách alebo v ráme. Porovnávací analýza môže pomôcť pri vypracovaní hypotézy v súvislosti s relatívnou expozíciou konkrétnemu tepelnému zdroju. Ak napr. pružiny v matracoch alebo poduškách stratili svoju pružnosť na jednom konci, zatiaľ či na druhom konci nie, dá sa urobiť hypotéza o polohe tepelného zdroja. Táto hypotéza musí zohľadniť aj ďalšie faktory, ako je vplyv vetrania a tiež dôkazy na požiarovisku, súvisiace s trvaním alebo intenzitou požiaru, miestom vzniku požiaru, smerom prenosu tepla alebo s relatívnou blízkosťou tepelného zdroja. Okrem toho je potrebné zohľadniť fakt, že posteľná súprava, vankúše a podušky môžu pružiny tieniť alebo poskytnúť ďalšie požiarne zaťaženie (NFPA 921:2014).

8.2.4.

Stopy indikujúce zanedbanie povinností na úseku ochrany pred požiarimi

Musil a kol. (2001) uvádzajú nasledovné stopy naznačujúce, že požiar vznikol následkom zanedbania povinností na úseku ochrany pred požiarimi:

- zapnuté elektrické spotrebiče v mieste vzniku požiaru alebo výbuchu (napr. variče, žehličky, elektrické ohrievače, ale tiež žiarovky ak boli zakryté ľahko horľavým materiálom – napr. papier, textil, seno alebo slama) alebo sa tieto nachádzajú v ich blízkosti,
- tepelné spotrebiče na plynné palivá, ak sa preukáže, že boli v prevádzke alebo ich uzatváracie ventily neboli tesné a dochádzalo k úniku plyných horľavých látok do okolia,
- zistené technické poruchy na elektrických alebo palivových systémoch motorových vozidiel,
- poruchy na elektroinštalácii v najrôznejších objektoch, ako sú napr. nefunkčné ističe, opravované poistky, neodborne opravené elektrické vedenie, poruchy na elektrických spotrebičoch a ich pripojení k rozvodnej sieti,
- zistené stopy po samovznietení rastlinných hmôt, uhlí a výrobkoch z uhlia a nenasýtených olejov (oleje s výskytom nenasýtených väzieb), resp. zistené znaky nasvedčujúce týmto dejom.

Zanedbania povinností na úseku ochrany pred požiarimi môže byť posúdené (v prípade právnických osôb a fyzických osôb-podnikateľov) predovšetkým na základe dokumen-

tácie o ochrane pred požiarmi vypracovanej podľa požiadaviek zákona č. 314/2001 Z. z. a vyhl. MV SR č. 121/2002 Z. z. Okrem toho pri posúdení, či požiar nevznikol následkom zanedbania povinností ustanovených všeobecne záväznými právnymi predpismi je potrebné vychádzať aj z dokladov o vykonaní odborných prehliadok a skúšok a úradných skúšok vyhradených technických zariadení podľa požiadaviek vyhl. MPSVaR č. 508/2009 Z. z.

Na základe dokumentácie o ochrane pred požiarmi a dokladov o vykonaní odborných prehliadok a skúšok je možné odhaliť niektoré zanedbania povinností na úseku ochrany pred požiarmi a bezpečnosti a ochrane zdravia pri práci z hľadiska právnickej osoby alebo fyzickej osoby-podnikateľa, ale nie je možné odhaliť nedbalostné konanie zamestnancov (napr. používanie otvoreného plameňa na mieste so zvýšeným nebezpečenstvom vzniku požiaru a pod.). Odhalenie takéhoto nedbalostného konania je vo väčšine prípadov možné na základe pamäťových stôp. Okrem toho je potrebné zobrať do úvahy, že v prípadoch kedy dokumentácia o ochrane pred požiarmi alebo doklady o odborných prehliadkach a skúškach a úradných prehliadkach a skúškach môžu viesť k odhaleniu nedbalostného konania, majú zodpovedné osoby tendenciu tvrdiť, že táto dokumentácia zhorela na mieste požiaru. V tomto prípade je potrebné zistiť kto vypracoval dokumentáciu a kto vykonal odborné prehliadky a skúšky a prípadne úradné skúšky vyhradených technických zariadení. Ak ich vypracovala externá organizácia je možné získať potrebné údaje od nej (aj v tomto prípade je však potrebné zobrať do úvahy, že strata uvedených dokumentov môže byť aj v záujme externej organizácie).

8.2.5.

Stopy indikujúce úmyselné spôsobenie požiaru

Musil a kol. (2001) uvádzajú nasledovné stopy naznačujúce úmyselné spôsobenie požiaru:

- zistenie dvoch alebo viacerých miest na ktorých vznikol požiar alebo výbuch,
- nájdenie zvyškov akceleratorov požiaru, ich obalov a zvyškov zariadení slúžiacich na iniciáciu výbušnín,
- stopy svedčiace o násilnom vniknutí do budovy (páčenje, prekonanie zámkových mechanizmov, rozbitie okien, prekonanie mechanických alebo elektronických zabezpečovacích zariadení a pod.),
- stopy po dopravných prostriedkoch alebo obuvi v blízkosti miesta udalosti, prípadne predmety, ktoré mohol páchatel na mieste činu odhodiť alebo stratiť.

Pri posudzovaní stôp svedčiacich o násilnom vniknutí do budovy je potrebné zachovať mimoriadne vysoký stupeň opatrnosti. Napr. v prípade násilne otvorených dverí je potrebné získať informácie, či ich neotvárali členovia zasahujúcej hasičskej jednotky. Rovnako rozbité okná automaticky neznamenajú násilný vstup do stavby. Okno môže byť rozbité páchatelom pri protiprávnom vniknutí do stavby alebo vhození zápalnej fľaše, následkom tepelného pôsobenia požiaru, osobami unikajúcimi zo stavby zasiahnutej požiarom alebo zasahujúcimi hasičskými jednotkami.

Posúdenie príčiny rozbitia okna je založené na preskúmaní tvaru črepín na mieste ich dopadu. Ak okno rozbili členovia hasičskej jednotky budú črepiny skla ležať prevažne v interiéri (o tomto je potrebné získať informácie od samotných členov hasičskej jednotky). Ak bolo sklo rozbité osobami unikajúcimi zo stavby budú črepiny sústredené

v blízkosti okna zo strany exteriéru (v takomto prípade sa môže na ich povrchu nájsť stopy krv – osoba, ktorá je vystavená účinkom požiaru môže byť nútená konať veľmi rýchlo). Ak bolo okno rozbité následkom priameho pôsobenia plameňa alebo teplotného rozdielu nájdu sa vysokou mierou pravdepodobnosti na črepinách stopy sadzí (aj na strane privrátenej k podlahe). V tomto prípade môžu byť črepiny lokalizované v interiéri aj exteriéri. V tomto prípade je potrebné preskúmať a zdokumentovať či sa črepiny všetkých okien z jednej steny nachádzajú na rovnakej strane. Ak sa črepiny zo všetkých okien nachádzajú v prevažne v exteriéri alebo v interiéri (na rovnakej strane) boli tieto okná s vysokou mierou pravdepodobnosti rozbité účinkom požiaru. Ak sa však črepiny z väčšiny okien jednej steny nachádzajú z väčšej časti v exteriéri a črepiny jedného okna z väčšej časti v interiéri, indikuje to rozbitie okna a násilné vniknutie do stavby. Explózia (napr. výbuch rozvíreného prachu) spôsobí rozbitie skla a vymrštenie črepín do relatívne veľkej vzdialenosti od stavby (ak sa v tomto prípade nájdu črepiny jedného okna v interiéri v priestore zasiahnutom výbuchom jedná sa s vysokou mierou pravdepodobnosti o úmyselný trestný čin úmyselného spôsobenia požiaru alebo výbuchu). Rozbitie okien a vymrštenie črepín môže spôsobiť aj backdraft (vzdialenosť rozletu črepín je však v tomto prípade nižšia ako v prípade explózie).

Ak je sklenená tabuľa upevnená v ráme, ktorý chráni hrany skla pred sálavým teplom z požiaru, dochádza k teplotným rozdielom medzi nechránenou časťou skla a chránenými hranami. Experimentálny výskum uvádza, že teplotný rozdiel asi 70 °C medzi stredom okennej tabule a chránenou hranou skla môže spôsobiť praskliny, ktoré začínajú na hranách skla. Praskliny sa javia ako jemné zvlnené línie, ktoré sa môžu šíriť a spájať. V závislosti od stupňa prasklín sklo môžu zostať v ráme alebo z neho vypadnúť. Ak okenná tabuľa nemá ochranu svojej hrany pred sálavým teplom z požiaru, sklo praskne pri vyššom teplotnom rozdieli. Pri experimentoch sa tiež zistilo, že bez ochrany hrán skla vzniká menej trhlín a zvyšuje sa pravdepodobnosť, že sklenená tabuľa zostane v celku (NFPA 921:2014).

Sklo rozbité nárazom vytvorí charakteristické pavučinové vzory. Praskliny budú mať priame línie a budú početné (NFPA 921:2014).

Ak jedna strana tabuľového skla príde náhle do kontaktu s plameňom a odvrátená strana je pomerne chladná, medzi oboma stranami skla vznikne pnutie a sklo medzi týmito stranami môže prasknúť (NFPA 921:2014).

Niekedy sa u malých okien stane, že rozpínanie medzi exponovanou a odvrátenou stranou okenného skla vymršť tabuľu z okenného rámu (NFPA 921:2014).

Samotný tlak vyvolaný požiarom, obvykle nie je dostatočne silný na to, aby rozbil okenné sklo alebo ho vytlačil z rámu. Tlak potrebný na rozbitie bežnej okennej tabule sa pohybuje od 2 do 7 kPa, zatiaľ čo pretlak pri bežných požiaroch býva od 0,01 do 0,03 kPa. Ak dôjde k deflagrácii, výbuchu splodín horenia (backdraft) alebo detonácii sklenené črepiny z okna rozbitého tlakom sa dajú nájsť ďalej od okna. Napr. pretlak 10 kPa môže vymršť črepiny do vzdialenosti 30 m (NFPA 921:2014).

Pri zisťovaní príčin vzniku požiarov sa nesmú robiť závery výlučne len na základe morfológie rozbitého skla. V oknách miestností susediacich s horiacim priestorom sa našli trhliny oboch typov, husté krátke i dlhé vlnité (NFPA 921:2014).

Okrem samotných stôp po úmyselnom spôsobení požiaru je pre proces zisťovania príčin vzniku požiarov potrebné zobrať do úvahy aj možný motív. Medzi najčastejšie motívy úmyselného spôsobenia požiaru patrí:

- pomsta (napr. prepustený zamestnanec),
- konkurenčný boj (napr. majiteľ konkurenčného podniku),
- vydieranie (nezaplatenie výpalného),
- poisťný podvod,
- snaha o zakrytie iného trestného činu (napr. sprenevery, ale aj obzvlášť závažných zločinov, napr. úkladnej vraždy),
- psychická porucha páchatela (napr. pyrománia alebo snaha o vyniknutie pri hasení požiaru).

Poisťný podvod môže byť odhalený na základe poisťnej zmluvy a účtovných dokladov (príslušníci HaZZ môžu tieto dokumenty vyžadovať na základe § 5 písm. j) zákona č. 314/2001 Z. z.). Medzi indikátory poisťného podvodu patrí vysoká poisťná suma, finančné problémy spoločnosti alebo problematický predaj zhoreného tovaru. V tomto prípade je potrebné preveriť, či sa v priestore zasiahnutom požiarom skutočne nachádzal zhorený tovar (často sa stáva, že v priestore požiaru sú iba lacné napodobeniny – napr. skrine z počítačov bez elektroniky).

V prípade požiaru spôsobeného páchatelom v dôsledku jeho psychickej poruchy (pyrománia alebo snaha o vyniknutie pri jeho hasení) je jeho odhalenie pomerne komplikované, nakoľko je ťažké vytypovať osoby s takýmto motívom. V tomto prípade majú kľúčovú úlohu stopy po požiari (motív sa nemusí dať použiť pri objasnení príčiny vzniku požiaru). Na psychickú poruchu páchatela sa dá usudzovať napr. v prípade opakovaného výskytu požiarov napr. v areály spoločnosti, ktoré vznikli za nevysvetlených okolností.

8.3.

Vyhľadávanie zvyškov horľavých kvapalín na mieste požiaru

Pri úmyselne spôsobených požiaroch veľmi často používajú páchatelia ako akcelerátory požiaru horľavé kvapaliny. Kľúčovou úlohou pri zisťovaní príčin vzniku požiaru je nájsť zvyšky týchto horľavých kvapalín (ak sa na mieste požiaru vyskytujú) a odobrať vzorky na laboratórnu analýzu.

Na vyhľadávanie zvyškov horľavých kvapalín na mieste vzniku požiaru sa používajú (Stauffer a kol. 2008):

- elektronické detektory,
- kolorimetrické trubice,
- psy na detekciu zvyškov horľavých kvapalín,
- absorbenty horľavých kvapalín,
- detekcia pod ultrafialovým svetlom,
- prenosný plynový chromatograf s hmotnostným spektrometrom (skratka GC-MS).

Všetky vyššie spôsoby vyhľadávania zvyškov horľavých kvapalín sa využívajú len za účelom zistenia miesta na odber vzoriek. Prítomnosť zvyškov horľavých kvapalín na mieste po požiari (na mieste vzniku požiaru) je možné dokázať len na základe skúšky v akreditovanom laboratóriu.

8.3.1.

Elektronické detektory

Elektronické detektory (doslovný preklad z angličtiny elektronické nosy) sa používajú na skenovanie mieste po požari s cieľom nájsť zvyšky horľavých kvapalín. Atmosféra nad povrchom je nasávaná do detektora, ktorý reaguje na prítomnosť horľavých plynov alebo prchavých organických látok (Stauffer a kol. 2008).

Najpoužívanejšími typmi elektronických detektorov sú detektor založený na princípe katalytického spaľovania, plameňovo ionizačný detektor a fotoionizačný detektor (Stauffer a kol. 2008).

V detektore na princípe katalytického spaľovania sú odsávané plyny z miesta požiaru do katalyzátorom pokrytého povrchu odporového článku, kde dochádza k oxidácii horľavých plynov. Teplo uvoľnené touto oxidáciou spôsobuje zmenu (nárast) odporu, ktorý je úmerný množstvu horľavého plynu prechádzajúceho cez odporový člen. Výsledky sú vyjadrené v objemovej koncentrácii (obyčajne v ppm). Tieto detektory sa obyčajne vyznačujú vysokou životnosťou, ale ich nevýhodou je vysoká citlivosť na zmenu relatívnej vlhkosti plynov privádzaných do detektora (Stauffer a kol. 2008).

Plameňovo ionizačný detektor je jedným z najpoužívanejších detektorov v plynovej chromatografii. Vzorka plynov z priestoru vzniku požiaru je k detektoru privádzaná pomocou čerpadla a následne spálená v plameni vodíka so vzduchom. Ak je do takéhoto plameňa privedená horľavá chemická zlúčenina (obsahujúca uhlík) uvoľňujú sa počas jej horenia ióny. Tieto ióny sú privádzané medzi dve elektródy s rozdielom potenciálov rádovo stovky voltov. Výsledkom je prúd tečúci medzi elektródami, ktorého hodnota je úmerná množstvu iónov medzi elektródami (Stauffer a kol. 2008).

Tieto detektory sú citlivé takmer na všetky horľavé zlúčeniny, ale existujú zlúčeniny (napr. CS_2 , H_2S , NO , N_2O , NH_3 a CO) na ktoré plameňovo ionizačné detektory sú citlivé veľmi málo alebo vôbec (Stauffer a kol. 2008).

Na podobnom princípe ako plameňovo ionizačný detektor pracuje fotoionizačný detektor. V tomto type detektora sú odsávané plyny z miesta po požari privádzané do detektora, kde sú vystavené pôsobeniu ultrafialového žiarenia, ktoré spôsobuje ionizáciu horľavých zlúčenín. Takto vzniknuté ióny sú privádzané medzi dve elektródy s rozdielom potenciálov, následkom čoho tečie medzi uvedenými elektródami elektrický prúd, ktorého veľkosť je úmerná množstvu ionizovaných molekúl (koncentracii horľavých látok v odsávanom plyne z miesta po požari). Napriek tomu, že tento typ detektora je citlivý na takmer všetky prchavé organické uhľovodíky (z ktorých väčšina nie je prítomná v horľavých kvapalinách), vykazuje dobrý pomer falošne pozitívnych reakcií (falošne pozitívna reakcia znamená, že detektor signalizuje prítomnosť zvyšku horľavej kvapaliny na mieste, kde sa nenachádza) (Stauffer a kol. 2008).

Prakticky všetky elektronické detektory pracujú podobným spôsobom. Obyčajne sú dobre prenosné a pozostávajú zo štyroch hlavných častí: sonda, čerpadlo, detektor a zariadenia na záznam údajov. Sondy sa líšia dĺžkou, ale väčšinou sú také dlhé, aby umožnili ľahký screening miesta po požari jednoduchým chodením a držaním sondy v ruke (Stauffer a kol. 2008).

8.3.2.

Kolorimetrické trubice

Kolorimetrické trubice sa využívajú na detekciu prítomnosti zvyškov horľavých kvapalín na mieste po požiaroch. Tieto trubice poskytujú vyššiu selektívnosť na niektoré chemické látky ako elektronické detektory. Kolorimetrické trubice pozostávajú zo sklenenej trubice naplnenej práškom navrhnutým tak, aby reagoval na prítomnosť vybranej chemickej látky alebo skupiny chemických látok zemnou farbou (Stauffer a kol. 2008).

Trubica sa umiestni nad testovanú vzorku. Následne je potrebné množstvo plynu nad tuhým povrchom odsáť cez detekčnú trubičku prostredníctvom ručného alebo elektrického čerpadla. Zmena farby indikuje prítomnosť chemickej látky (alebo skupiny chemických látok) na ktorú je trubica citlivá (Stauffer a kol. 2008).

Hlavnou výhodou týchto detekčných trubíc (v porovnaní s elektronickými detektormi) je nižšia cena. Tieto trubice okrem toho poskytujú selektívnu citlivosť na určitú chemickú zlúčeninu alebo skupinu chemických zlúčenín, čo môže byť výhodou, ale aj nevýhodou v porovnaní s elektronickými detektormi citlivými na väčšinu horľavých chemických zlúčenín. Nevýhodou týchto trubíc je, že vo väčšine prípadov nie sú citlivé len na chemickú látku (alebo skupinu chemických látok) pre ktorú sú navrhnuté, ale vykazujú citlivosť aj na iné chemické látky (Stauffer a kol. 2008).

8.3.3.

Psy na detekciu zvyškov horľavých kvapalín

Prvé psy na vyhľadávanie zvyškov horľavých kvapalín na mieste po požiaroch boli vycvičené v roku 1986 v USA. Tento spôsob vyhľadávania je veľmi univerzálny a účinný na mieste po požiaroch, aj keď výcvik a starostlivosť o psa sú časovo a finančne náročné (Stauffer a kol. 2008).

Princíp detekcie zvyšku horľavej kvapaliny vycvičeným psom je založený na skutočnosti, že pes má podstatne citlivejší čuch ako človek. Následkom toho má pes podstatne nižší prah citlivosti na pach horľavej kvapaliny, ako človek (Furton a Myers 2001).

Pes musí byť na vyhľadávanie zvyškov horľavých kvapalín vycvičený. Tím na vyhľadávanie zvyškov horľavých kvapalín pozostáva zo psovoda a samotného psa na vyhľadávanie horľavých kvapalín. Takto vytvorený tím prechádza po mieste po požiaroch. Keď pes zacíti horľavú kvapalinu, pes toto miesto označí navičeným signálom (Stauffer a kol. 2008).

Výhodou používania psov na detekciu zvyškov horľavých kvapalín je ich vysoká spoľahlivosť detekcie a schopnosť samostatne nájsť miesto rozliatia horľavej kvapaliny. Podľa Stauffera a kol. (2008) vykazujú psy dokonca vyššiu spoľahlivosť (pri vyhľadávaní nepatrných zvyškov horľavých kvapalín) ako moderné laboratórne metódy (plynová chromatografia v spojení s hmotnostnou spektrometriou). Tento záver však nemusí byť celkom jednoznačný, lebo citlivosť GC-MS závisí od konštrukčného vyhotovenia konkrétneho prístroja.

8.3.4.

Absorbenty horľavých kvapalín

Jedným z najnovších spôsobov na detekciu zvyškov horľavých kvapalín na mieste po požiari vyvinul John H. Woodloan, ktorý si nechal patentovať 25. Marca 2003 pod názvom *Metóda a zmes pre detekciu horľavých kvapalín*. Táto zmes pozostáva z prášku navrhnutého tak, aby sa dal naniesť na predpokladané miesto rozliatia horľavej kvapaliny, následne absorboval jej zvyšok a indikoval jej prítomnosť zemnou farby (Stauffer a kol. 2008).

Uvedená zmes pozostáva z dvoch práškov, ktoré musia byť zmiešané pred použitím. Prvý prášok je absorbent a kontrastná látka pre farebný indikátor. Druhý je prášok má funkciu farebného indikátora prítomnosti zvyšku horľavej kvapaliny (Stauffer a kol. 2008).

Výhodou tohto spôsobu detekcie prítomnosti zvyšku horľavej kvapaliny je relatívne nízka cena absorbentu. Naopak nevýhodou je sklon k falošne pozitívnej reakcii (najmä na povrchu uvoľňujúcom plynne produkty pyrolýzy) (Stauffer a kol. 2008).

8.3.5.

Detekcia pod ultrafialovým svetlom

Použitie ultrafialového svetla na detekciu miesta po vyliatí horľavej kvapaliny sa používa približne od polovice 70 rokov. Odvtedy táto technika nikdy neprešla významným vývojom nebola publikované žiadna vedecká štúdia na potvrdenie jej účinnosti pri vyhľadávaní zvyškov horľavých kvapalín. Toto je pravdepodobne výsledkom relatívne nízkej účinnosti tejto metódy. Výsledky novších výskumov publikované Saitohom a Takeuchiom (2005) sú však veľmi zaujímavé a naznačujú slubnú budúcnosť detekcie zvyškov horľavých kvapalín. Tento systém však vyžaduje použitie časovo riadeného systému s Nd-YAG laserom (Saitoh a Takeuchi 2005 a Stauffer a kol. 2008).

Väčšina horľavých kvapalín je na báze destilátov ropy. Takéto horľavé kvapaliny obsahujú zlúčeniny, ktoré svietia pri ich expozícii ultrafialovým žiarením. Svetielkovanie je spojené s výskytom dvojitých väzieb. Vo všeobecnosti je možné tvrdiť, že viac konjugované dvojité väzby vykazujú vyššiu intenzitu svietielkovania (Stauffer a kol. 2008).

8.3.6.

Prenosný chromatograf s hmotnostným spektrometrom

V súčasnosti existujú plynové chromatografy s hmotnostným spektrometrom aj v prenosnom vyhotovení. Výhodou takýchto zariadení je, že umožňujú získať výsledky o prítomnosti alebo neprítomnosti horľavých kvapalín v zvyškoch po požiari v kvázi reálnom čase (rádovo minúty, ale v niektorých prípadoch aj v čase kratšom ako jedna minúta). Nevýhodou však je ich nižšia spoľahlivosť, ako klasických plynových chromatografov s hmotnostným spektrometrom. Okrem toho je potrebné dodať, že niektoré prenosné chromatografy neobsahujú (z dôvodu zníženia hmotnosti a ceny) hmotnostný spektrometer, ale používajú iné detektory (Stauffer a kol. 2008).

Výsledky z prenosných plynových chromatografov s hmotnostným spektrometrom by mali byť považované len za orientačné. Majú vyššiu spoľahlivosť, ako ostatné vyššie uvedené prostriedky (okrem psov), ale na druhej strane ich spoľahlivosť nedosahuje úroveň výsledkov stabilných plynových chromatografov s hmotnostným spektrometrom v akreditovanom laboratóriu.

8.4. Odber vzoriek

Účelom odberu vzoriek z miesta po požiaroch, je odobrať reprezentatívnu vzorku za účelom jej laboratórneho preskúmania, výsledkom ktorého sú údaje potvrdzujúce alebo vyvracajú hypotézu o príčine vzniku požiaru.

Z miesta po požiaroch sa môžu (podľa potreby) odberať vzorky najrôznejších materiálov a technických zariadení. V prípade technických zariadení je potrebné odobrať z miesta po požiaroch ako vzorku celé zariadenie (napr. elektrotepelný spotrebič, elektrický rozvádzač a pod.). V prípadoch, kedy to nie je možné (napr. elektrický skrat na kábloch) je potrebné odobrať dostatočné množstvo vzorky (napr. dostatočný kus kábla pred a za miestom vzniku skratu). Každý odber vzorky má byť riadne dokumentovaný (napr. popis miesta a stavu vzorky pred odberom, popis postupu odberu a balenia vzorky a pod.). Okrem toho je potrebné pri odbere vzorky spraviť fotodokumentáciu (v ideálnom prípade s použitím pravítka pre možnosť odčítania vzdialenosti z fotografie).

Ako vyplýva z popisu vyššie z miesta po požiaroch je možné (a často aj potrebné) odobrať vzorku prakticky akéhokoľvek materiálu alebo zariadenia. Ďalšia časť tejto podkapitoly bude zameraná predovšetkým na odber vzoriek zvyškov horľavých kvapalín.

Všeobecný postup odberu vzorky z miesta po požiaroch uvádzaný Staufferom a kol. (2008) je:

- výber vzorky,
- odber vzorky,
- balenie vzorky,
- zapečatenie vzorky,
- transport vzorky do laboratória.

Výber miesta z ktorého bude odberať vzorka pre potreby posúdenia prítomnosti zvyškov horľavých kvapalín je realizovaný na základe preskúmania miesta po požiaroch niektorým zo spôsobov popísaným v podkapitole 8.3.

Samotný odber vzorky sa môže vykonať **priamym** alebo **nepriamym spôsobom**. Pri priamom spôsobe sa odberie a konzervuje priamo nosič (materiál na ktorom sa predpokladá, že bola rozliata horľavá kvapalina – napr. časť drevenej podlahy, koberca alebo nábytku). Pri nepriamom spôsobe sa odberie len časť zvyšku horľavej kvapaliny z nosiča (materiálu na ktorom bola rozliata) prostredníctvom absorbentu, ktorý sa ďalej konzervuje (Stauffer a kol. 2008).

Na absorpciu zvyškov horľavých kvapalín sa podľa Stauffera a kol. (2008) používajú všeobecne používané absorbenty, prenosný vzorkovač pre zisťovanie príčin vzniku požiarov, absorbent horľavých kvapalín a stery štetcom.

Po odobratí je potrebné uložiť vzorky do vzorkovnice, ktorá musí spĺňať nasledovné podmienky (Stauffer a kol. 2008):

- umožňuje bezpečnú konzerváciu a dopravu vzorky,
- chráni proti stratám zvyšku horľavej kvapaliny zo vzorky,
- chráni vzorku pred kontamináciou inou horľavou kvapalinou.

Podľa Stauffera a kol. (2008) sa na uloženie vzoriek používajú kovové vzorkovnice, plastové vrecká a sklenené vzorkovnice. Výber vzorkovnice pre konkrétny prípad sa musí riadiť vyššie uvedenými podmienkami. Okrem toho musí byť vybratá taká vzorkovnica, ktoré nebude reagovať s nosičom ani zvyškom horľavej kvapaliny. Prakticky najspoľahlivejšie z tohto hľadiska sú sklenené vzorkovnice. Pri konkrétnom výbere nádoby (sklenenej vzorkovnice) je však potrebné overiť, či nebude dochádzať k chemickej reakcii nosiča alebo zvyšku horľavej kvapaliny s tesnením tejto nádoby.

Zapečatenie vzorky je dôležité kvôli preukázaniu, že s ňou nebolo od momentu jej odberu a uloženia do vzorkovnice až do jej otvorenia v akreditovanom laboratóriu manipulované (Stauffer a kol. 2008).

Najbežnejšia doprava vzorky do laboratória je osobné odovzdanie zisťovateľom alebo zaslanie kuriérskou spoločnosťou (Stauffer a kol. 2008).

9

Laboratórna analýza vzoriek

Vzorky sa po odobratí a doprave do laboratória podrobujú laboratórnym skúškam. Laboratórne sa môžu skúmať rôzne vlastnosti (napr. požiarnotechnické, chemické, fyzikálne, mechanické atď.) rozličných vzoriek. Táto kapitola je zameraná len na laboratórnu analýzu zvyškov po požiari s cieľom stanoviť prítomnosť zvyškov horľavých kvapalín a na analýzu natavených častí vodičov elektrickým skratom s cieľom zistiť, či sa jednalo o primárny alebo sekundárny skrat.

9.1.

Analýza zvyškov horľavých kvapalín

Analýza zvyškov horľavých kvapalín sa delí na extrakciu zvyškov horľavých kvapalín z odobratých vzoriek zvyškov po požiari a samotnú analýzu.

9.1.1.

Extrakcia zvyškov horľavých kvapalín

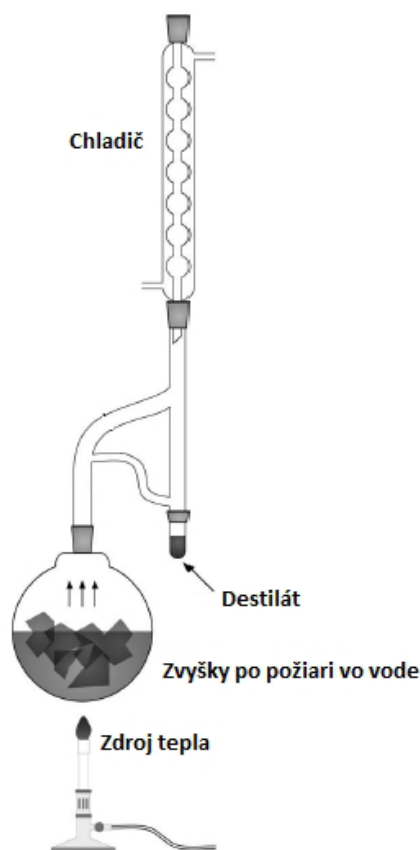
Na extrakciu zvyškov horľavých kvapalín z odobratých vzoriek zvyškov po požiari sa používajú štyri základné techniky (Stauffer a kol. 2008):

1. destilácia:
 - destilácia vodnou parou,
 - vákuová destilácia,
 - ostatné druhy destilácie,
2. rozpúšťanie v:
 - sírouhľiku,
 - pentáne,
 - dietyléteri,
 - dichlórmétáne,
 - iných rozpúšťadlách,
3. headspace:
 - s ohrevom,
 - bez ohrevu,
4. adsorpcia:
 - dynamický mód,
 - pasívny mód.

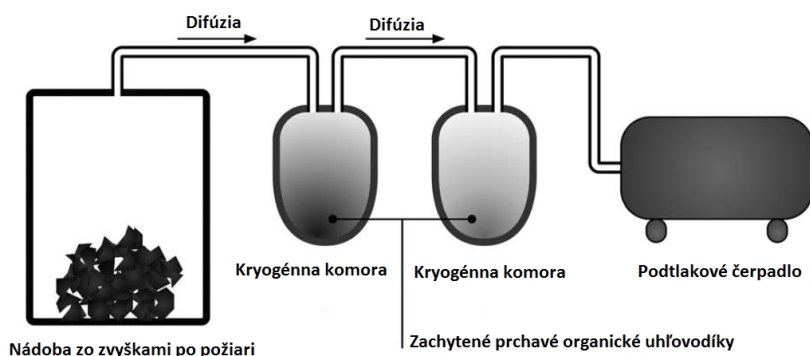
Destilácia vodnou parou je špeciálny typ destilácie pri ktorej je zmes počas destilácie umiestnená (namočená) vo vode, ktorá má funkciu nosnej kvapaliny. Hlavnou výhodou tohto typu destilácie je možnosť odparenia (destilácie) prchavých organických uhľovodíkov s teplotou varu vyššou ako voda pri nižšej teplote (ako je teplota ich varu). Táto skutočnosť je daná faktom, že ak sa zmiešajú nemiešateľné kvapaliny, celkový tlak zmesi je rovný sume tlakov všetkých kvapalín tvoriacich zmes. Destilácia teda môže prebiehať pri relatívne nízkej teplote (pod 100 °C), pri ktorej ešte nedochádza k rozkladu väčšiny organických zlúčenín a ani k pyrolýze nosiča vzorky. Principiálnu schému destilácie vodnou parou ilustruje obr. 9-1 (Stauffer a kol. 2008).

Vákuová destilácia (korektnejší názov je destilácia pri zníženom tlaku) je destilačná technika bez pridania nosnej kvapaliny. Znížením tlaku vo vnútri destilačnej komory dochádza k významnému zníženiu teploty varu kvapalín v zmesi. Vákuová destilácia teda umožňuje odparenie zložiek zmesi pri podstatne nižšej teplote, ako pri normálnom tlaku (Stauffer a kol. 2008).

Principiálnu schému vákuovej destilácie ilustruje obr. 9-2.



Obrázok 9-1 Principiálna schéma destilácie vodnou parou (Stauffer a kol. 2008)



Obrázok 9-2 Principiálna schéma vákuovej destilácie (Stauffer a kol. 2008)

Ostatné druhy destilácie používajú zmes etanolu a vody alebo čistého etylénglykolu.

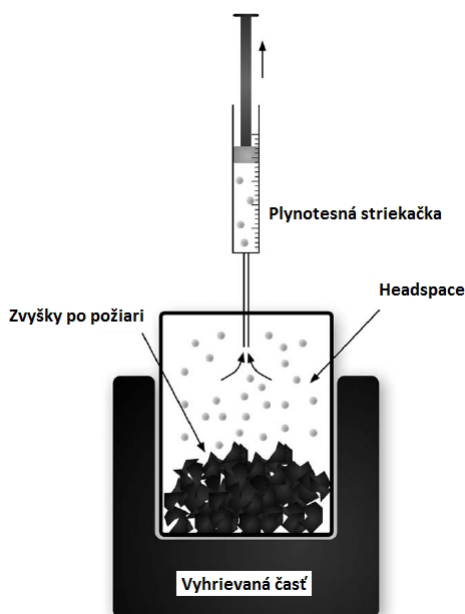
Rozpúšťanie je jednoduchá metóda, ktorá pozostáva z extrakcie vzoriek zvyškov po požari v rozpúšťadle s cieľom vypláchnuť zvyšky horľavej kvapaliny do rozpúšťadla.

Keď je vzorka umiestnená (namočená) do rozpúšťadla dochádza k distribúcii zvyškov horľavých kvapalín medzi nosičom a rozpúšťadlom. Distribúcia nastane v dôsledku rozdeľovacieho koeficienta, ktorý závisí od vlastností nosiča, rozpúšťadla a vlastností extrahovanej kvapaliny (Stauffer a kol. 2008).

Po extrakcii je potrebné rozpúšťadlo (s extrahovanými zvyškami horľavých kvapalín) prefiltrovať (od drobných úlomkov z nosiča vzorky) a zvýšiť koncentráciu zvyšku horľavej kvapaliny v rozpúšťadle (napr. odparením časti rozpúšťadla) (Stauffer a kol. 2008).

Headspace je najjednoduchší a najrýchlejší spôsob extrakcie zvyškov horľavých kvapalín. Táto technika je založená na uložení vzorky do plynotesne uzatvorenej nádoby (obyčajne sklenenej). Nádoba môže byť uložená pri laboratórnej teplote alebo zahriata na teplotu 60 až 90 °C (nikdy nie nad 100 °C). Zvyšky horľavej kvapaliny sa za týchto podmienok začnú odparovať do nádoby (vzorkovnice). Vzorka plynov z nádoby sa následne nasaje do plynotesnej striekačky (bežná plastová striekačka nie je vhodná) a následne sa táto manuálne vstrekuje do plynového chromatografu na analýzu (Stauffer a kol. 2008).

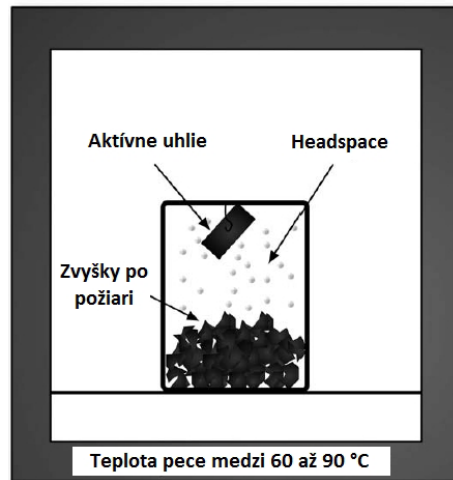
Princíp headspace extrakcie zvyškov horľavých kvapalín ilustruje obr. 9-3.



Obrázok 9-3 Principiálna schéma extrakcie zvyškov horľavých kvapalín metódou headspace (Stauffer a kol. 2008)

Podobnou metódou ako headspace je absorpcia. Pri tejto technike sa z nádoby neodoberajú vzorky pomocou plynotesnej striekačky, ale sa naadsorbujú do adsorbentu. Základný princíp adsorpcie ilustruje obr. 9-4 (Stauffer a kol. 2008).

Existujú dva hlavné módy adsorpcie, pasívny a dynamický. V pasívnom móde je adsorbent umiestnený v headspace. V dynamickom móde je headspace nad vzorkou presávané cez adsorbent (Stauffer a kol. 2008).



Obrázok 9-4 Principiálna schéma extrakcia zvyškov horľavých kvapalín metódou adsorpcie (Stauffer a kol. 2008)

9.1.2. Chromatografia

Pojem chromatografia sa všeobecne používa na rôzne separačné techniky založené na rozdeľovaní jednotlivých zložiek vzorky medzi mobilnú fázu, ktorá môže byť plynná alebo kvapalná a stacionárnu fázu, ktorá je v kvapalnom alebo pevnom skupenstve. Za zakladateľa chromatografie sa všeobecne považuje ruský botanik M. S. Cvet, ktorý v r. 1903 rozdelil rastlinné farbivá na stĺpci sorbentu a ako prvý objasnil chromatografický proces a na jeho prácach sú založené všetky následné chromatografické techniky. Z dôvodu nedostatočnej prístrojovej techniky nebola chromatografia využívaná niekoľko desaťročí. Až v štyridsiatych rokoch 20. storočia sa opätovne vzbudil záujem o túto separačnú metódu. Spresňovaním teórie chromatografie a zdokonaľovaním prístrojovej techniky nastal búrlivý rozvoj chromatografie, ktorý trvá dodnes.

Medzi dnes používanými chromatografickými postupmi zaujímajú najdôležitejšie miesto metódy kolónovej chromatografie. Ich význam neustále vzrastá, pretože umožňujú analyzovať prakticky všetky organické látky v koncentráciách od desiatok percent po stopové koncentrácie a to od nízkomolekulových látok až po makromolekuly s relatívnou molekulovou hmotnosťou niekoľko miliónov. Veľký význam má však aj chromatografická analýza anorganických látok. Plynová chromatografia umožňuje v niektorých prípadoch lepšie využiť univerzálnu a citlivú detekciu stopových množstiev látok s malou a strednou relatívnou molekulovou hmotnosťou. Kvapalinová chromatografia naproti tomu pomáha riešiť problémy analýzy napr. termicky labilných látok ako aj polymérov.

V súčasnosti sa názvom chromatografické metódy označujú všetky operácie, ktoré sú síce založené na rôznych fyzikálno-chemických princípoch, ale majú spoločné to, že pri nich dochádza k postupnému, mnohokrát opakovanému vytváraniu rovnovážnych stavov separovaných látok medzi dvoma alebo viacerými fázami. **Fáza** umiestnená v kolóne alebo na plochej vrstve sa nazýva **stacionárna**, fáza nesúca separované látky lôžkom

stacionárnej fázy sa nazýva **mobilná**. Pri pohybe mobilnej fázy nastáva separácia, ktorej princíp spočíva v tom, že jednotlivé zložky zmesi sa líšia vo svojich afinitách k dvom navzájom nemiešateľným fázam, s ktorými sú v styku.

Chromatografické metódy sa zvyčajne rozdeľujú z viacerých hľadísk, z ktorých najčastejšie používané sú:

- povaha afinitných síl,
- skupenstvo jednotlivých fáz,
- typ vyvíjania,
- spôsob realizácie.

Afinitné sily uplatňujúce sa pri chromatografickom procese:

- van der Waalove adsorpčné sily,
- rozpustnosť látok v príslušných fázach,
- elektrické náboje rozdeľovaných látok.

Okrem toho sem možno zaradiť aj rozličnú veľkosť molekúl a biošpecifické interakcie.

Podľa povahy afinitných síl hovoríme o chromatografii adsorpčnej, rozdeľovacej, ionexovej, afinitnej a gélovej.

Stacionárna fáza je zvyčajne pevná alebo kvapalná, mobilná sa môže vyskytovať v plynnom alebo kvapalnom skupenstve. Podľa skupenstva mobilnej fázy rozoznávame **plynovú a kvapalinovú chromatografiu**. Podľa skupenstva stacionárnej fázy potom oba tieto typy delíme ešte na adsorpčnú a rozdeľovaciu chromatografiu.

Podľa typu vyvíjania sa chromatografia rozdeľuje na frontálnu, vytlačiaciu a elučnú. V analytickej chémii sa používa prakticky len elučná chromatografia a všetky chromatografické metódy v tejto učebnici popisujú tento typ.

Chromatografia môže byť realizovaná buď v **plošnom** alebo **kolónovom usporiadaní**. V prvom prípade ide len o kvapalinovú chromatografiu a to papierovú a tenkovrstvovú, kolónové usporiadanie sa používa pri kvapalinovej aj plynovej chromatografii. V súčasnosti sa používa takmer výhradne kolónová chromatografia.

Chromatografia sa považuje za separačnú techniku, ktorá využíva delenie zložiek medzi dve fázy, z ktorých jedna je mobilná a druhá stacionárna. Pri delení dochádza k opakovanému transportu molekúl zložiek do stacionárnej fázy a opäť do fázy mobilnej. Pritom sa chromatografický proces natoľko približuje rovnováhe, že distribúciu zložky medzi dve fázy môžeme popísať distribučnou konštantou. Distribučná (rozdeľovacia) konštanta zložky A je pomer rovnovážnych koncentrácií zložky v oboch fázach, pričom podľa konvencie sa koncentrácia zložky v stacionárnej fáze uvádza v čitateli:

$$K_{D(A)} = \frac{[A]_s}{[A]_m} = \frac{(n_A)_s \cdot V_m}{(n_A)_m \cdot V_s} \quad (-) \quad [9.1]$$

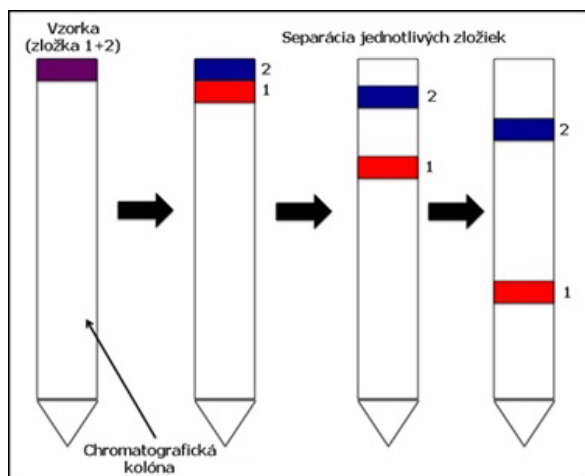
Trvalý pohyb mobilnej fázy však bráni dosiahnutiu skutočnej termodynamickej rovnováhy a posúva molekuly zložiek k ďalšej časti stacionárnej fázy, kde sa znovu vytvorí približný rovnovážny stav.

9.1.2.1. Princípy chromatografického procesu

Na objasnenie princípu chromatografického procesu je potrebné definovať niektoré pojmy:

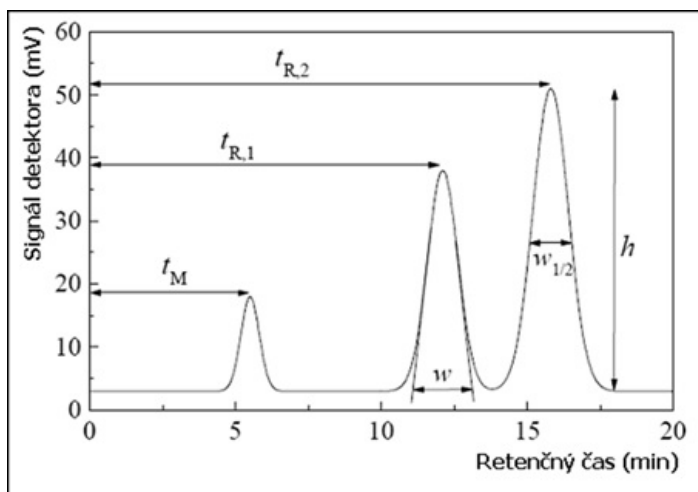
- **mobilná fáza** – pohyblivá fáza (plyn alebo kvapalina),
- **stacionárna fáza** – nepohyblivá fáza, ktorá môže mať rôznu formu – častice s veľkosťou niekoľkých jednotiek až niekoľkých desiatok mikrometrov (v niektorých prípadoch aj niekoľkých stoviek mikrometrov), tenká vrstvička kvapaliny nanosená na tuhom nosiči, resp. film kvapaliny na vnútornej strane kapiláry (pre stacionárnu fázu sa používa aj pojem *sorbent*),
- **kolóna** – valec vyrobený s rôzneho materiálu (kov, sklo, titán ap.), rôzneho priemeru (desatiny milimetra až centimetre) aj dĺžky (niekoľko centimetrov až desiatky metrov), naplnený sorbentom,
- **vzorka** – zmes látok, ktorá má byť separovaná, resp. má v nej byť určená (identifikovaná, resp. aj stanovená) jedna alebo niekoľko látok,
- **zložka** – látka, ktorá má byť separovaná zo vzorky.

Cez kolónu naplnenú sorbentom postupuje určitou rýchlosťou mobilná fáza (obr. 9-5). Na začiatok kolóny sa nadávkuje vzorka, ktorá obsahuje v našom prípade len dve látky – zložka 1 a 2. Mobilná fáza unáša vzorku na koniec kolóny, pričom zložka 2 postupuje pomalšie ako zložka 1 – je teda viac retardovaná. Pri postupe vzorky kolónou dochádza k dvom extrémnym prípadom – molekuly zložiek sú buď v mobilnej fáze (v tom prípade sa pohybujú rovnakou rýchlosťou ako mobilná fáza) alebo sú zadržované na sorbente (vtedy sa nepohybujú vôbec). Pri prechode kolónou v skutočnosti dochádza k rýchlej zmene týchto extrémov a každá molekula prejde mnohokrát z prúdu mobilnej fázy na povrch sorbentu a späť. Čas, ktorý molekula danej zložky zotrúva na povrchu sorbentu, závisí na veľkosti interakcie medzi zložkou a sorbentom. V konečnom dôsledku od veľkosti týchto interakcií závisí poradie, v akom zložka vychádza (eluuje) z kolóny. Čím väčšie sú tieto interakcie, tým neskôr zložka eluuje, má teda väčší **retenčný čas**.



Obrázok 9-5 Schematické znázornenie delenie vzorky s dvoma zložkami (<http://chemwiki.ucdavis.edu>, upravené)

Prístroje, na ktorých sa chromatografická separácia vykonáva, sa nazývajú **chromatografy**. Dôležitou súčasťou chromatografu je detektor, ktorý deteguje zložku vychádzajúcu z kolóny. Signál z detektora sa prenáša na záznamové zariadenie (v súčasnej dobe takmer výlučne počítač so špeciálnym programom) a výsledkom je záznam chromatografickej separácie – **chromatogram** (obr. 9-6).



Obrázok 9-6 Chromatogram separácie dvojzložkovej zmesi. t_M – retenčný čas inertu, w – šírka píku na základnej línii, $w_{1/2}$ – šírka píku v polovičnej výške, $t_{R,1}$ – retenčný čas zložky 1, $t_{R,2}$ – retenčný čas zložky 2 (Univerzita Karlova v Praze 2004, upravené)

Na obr. 9-6 sú dve vlny, ktoré poukazujú na poradie, v akom opúšťali separované zložky chromatografickú kolónu. Vlny sa nazývajú aj chromatografické vlny, retenčné (elučné) krivky, ale najčastejšie **píky**. Nástrek označuje okamih, kedy bola vzorka injektovaná (nadávkovaná) do kolóny. Na osi y sa vynáša odozva detektora, ktorá je spravidla funkciou koncentrácie eluovanej zložky v mobilnej fáze, na osi x čas.

Pri prechode separovanej látky kolónou prejde každá molekula vzorky mnohonásobne z mobilnej fázy do stacionárnej a späť. Doba, počas ktorej sa separovaná látka zadrží na sorbente, závisí na veľkosti interakcií a určuje poradie, v akom zložka vychádza z kolóny. Čím väčšie sú interakcie látky so stacionárnou fázou, tým väčší je elučný čas (elučný objem).

Charakteristickou veličinou pre každú chromatografovanú látku v danom chromatografickom systéme je elučný čas t_R alebo elučný objem V_R . Elučný čas je doba, ktorá uplynie od nástreku vzorky po dosiahnutie maxima elučnej krivky a elučný objem je pretečený objem mobilnej fázy počas tejto doby. Tieto dve veličiny spolu súvisia a možno ich vyjadriť vzťahom:

$$V_R = t_R \cdot F_m \quad [9.2]$$

kde F_m je objem mobilnej fázy pretečenej kolónou za jednotku času (objemová rýchlosť toku).

Elučný objem V_R je daný súčtom dvoch objemových veličín:

$$V_R = V'_R + V_M \quad [9.3]$$

kde V'_R je redukovaný elučný objem (niekedy býva označovaný ako skutočný elučný objem) a V_M – mŕtvy elučný objem predstavujúci celkový objem, ktorý zaujíma mobilná fáza od miesta nástreku cez kolónu až po detektor. V_R sa tiež nazýva zdanlivý elučný objem. Mŕtvy elučný objem V_M sa zistí experimentálne ako elučný objem nesorbujúcej sa (tzv. inertnej) látky.

Na hodnotenie účinnosti kolóny boli zavedené pojmy počet teoretických priehradok n a výškový ekvivalent teoretickej priehradky H . Podľa teórie teoretickej priehradky si chromatografickú kolónu môžeme predstaviť ako rad za sebou idúcich stupňov – teoretických priehradok. Teoretická priehradka je potom tá časť kolóny, v ktorej sa uskutoční jedno rozdelenie medzi dve fázy. Počet teoretických priehradok kolóny sa zistí experimentálne dosadením nameraných parametrov do vzťahu:

$$n = 16 \left(\frac{V_R}{w} \right)^2 = 5,545 \left(\frac{V_R}{w_{1/2}} \right)^2 \quad [9.4]$$

kde w je šírka píku (elučnej krivky) na základnej línii vyjadrená v jednotkách objemu, $w_{1/2}$ je šírka píku v polovičnej výške. Ak teda poznáme n (počet teoretických priehradok) a celkovú dĺžku kolóny L , ľahko vypočítame výškový ekvivalent teoretickej priehradky H podľa vzťahu:

$$H = \frac{L}{n} \quad [9.5]$$

Rozlíšenie ($R_{1,2}$) sa vyjadruje ako rozdiel elučných objemov separovaných látok 1 a 2, delený priemernou hodnotou šírky elučných kriviek:

$$R_{1,2} = \frac{2(V_{R_2} - V_{R_1})}{w_1 + w_2} \quad [9.6]$$

Kapacitný pomer k je vyjadrený ako pomer celkového množstva separovanej látky v stacionárnej fáze k jej celkovému množstvu v mobilnej fáze:

$$k = K_D \cdot \frac{V_S}{V_M} \quad [9.7]$$

kde K_D je distribučná konštanta, V_S – objem stacionárnej fázy, V_M – objem mobilnej fázy v kolóne, t.j. *mŕtvy objem kolóny*. V praxi sa hodnota k vypočíta jednoducho zo vzťahu:

$$k = \frac{V_R - V_M}{V_M} \quad [9.8]$$

Inými slovami, kapacitný pomer vyjadruje, koľkokrát je elučný objem separovanej látky väčší než mŕtvy objem; teda predstavuje počet voľných objemov kolóny potrebných k elúcii koncentračného maxima separovanej látky. Na základe jeho hodnoty je možné odhadnúť, do akej miery možno eluovať látky z kolóny v prijateľnom čase a koncentračnom profile. Pokiaľ je hodnota kapacitného pomeru malá ($k = 1$ až 10), sú aj elučné objemy malé a trvanie analýzy je krátke. Ak sa k nachádza v intervale od 20 do 1000, sú naopak elučné objemy príliš veľké a dochádza k rozširovaniu píkov a k znižovaniu detekčných limitov.

Zložky migrujú chromatografickou kolónou iba vtedy, keď sa nachádzajú v mobilnej fáze a relatívna rýchlosť ich pohybu vzhľadom na rýchlosť mobilnej fázy je tým menšia, čím väčšiu afinitu k stacionárnej fáze vykazujú. Vlastným mechanizmom separácie je teda neustále porušovanie rovnovážneho rozdelenia zložiek vzorky medzi obe fázy v dôsledku konvektívneho pohybu jednej z nich a úsilie systému obnoviť porušenú rovnováhu difúziou.

Pri reálnej chromatografickej separácii často dochádza k súčasnému uplatneniu dvoch i viacerých separačných mechanizmov a jeden a ten istý sorbent môže deliť látky na základe niekoľkých úplne odlišných princípov. Napr. oxid hlinitý rozdeľuje v prostredí hexánu aromatické uhľovodíky na princípe adsorpčnej chromatografie, vo vode však rozdeľuje bielkoviny na princípe gélovej permeačnej chromatografie a vo vodnom roztoku metanolu alkaloidy na princípe iónovej výmeny. Nasledujúci popis jednotlivých mechanizmov je vhodný z didaktického hľadiska, treba si však uvedomiť, že situácia je v skutočnom chromatografickom systéme zvyčajne komplikovanejšia.

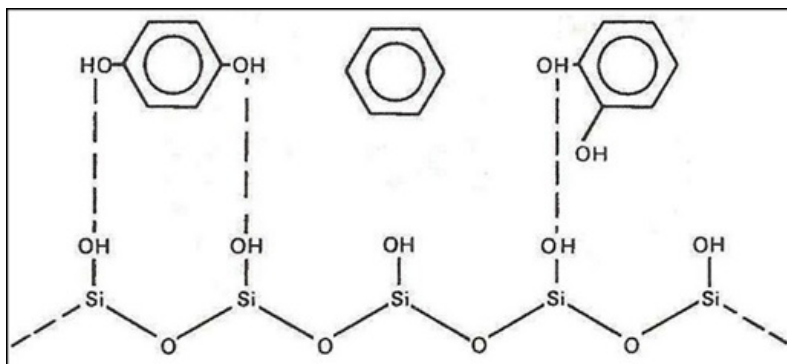
9.1.2.2. Separačné mechanizmy

Teoreticky možno rozdeliť sorpčné procesy na niekoľko jasne definovaných skupín, ktorých mechanizmus je pomerne dobre objasnený. Pri reálnej chromatografickej analýze však často dochádza k súčasnému uplatneniu dvoch i viacerých separačných mechanizmov a ten istý sorbent môže deliť látky na základe niekoľkých úplne odlišných princípov.

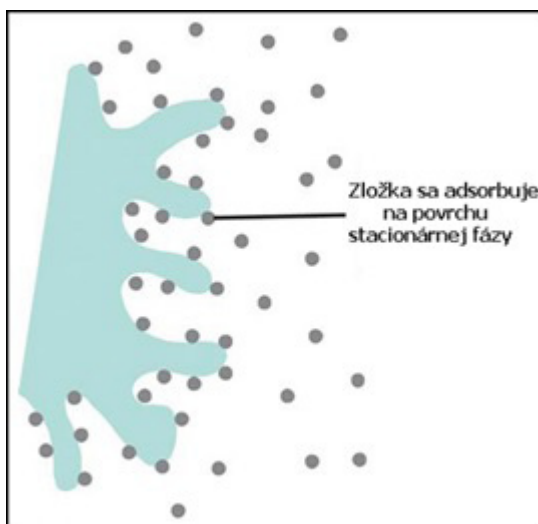
Adsorpčná chromatografia

Na tomto princípe pracuje kvapalinová aj plynová chromatografia (LSC a GSC). Molekuly vzorky sa pri adsorpcii z plynu alebo z roztoku na povrchu pevného adsorbenta, pričom sa rozlišuje fyzikálna adsorpcia a chemisorpcia. Fyzikálna sorpcia je založená na pôsobení van der Waalsových síl. Energie týchto interakcií sú väčšinou veľmi malé, ale rýchlosť fyzikálnej adsorpcie je veľká. V chemisorpcii dochádza k vzniku iónovej alebo kovalentnej väzby a energia rádovo zodpovedá vzniku väzby pri chemickej reakcii. Kapacita povrchu je oveľa menšia než pri fyzikálnej sorpcii, pretože zložka reaguje len na aktívnych centrách adsorbenta.

Reálny proces prebieha spravidla medzi týmito dvoma extrémami, t.j. medzi fyzikálnou adsorpciou a chemisorpciou. Okrem van der Waalsových síl, ktoré tvoria podstatu interakcií medzi nepolárnou zložkou a nepolárnym sorbentom, sa niekedy podieľa na adsorpcii tiež tvorba vodíkových mostíkov (obr. 9-7).



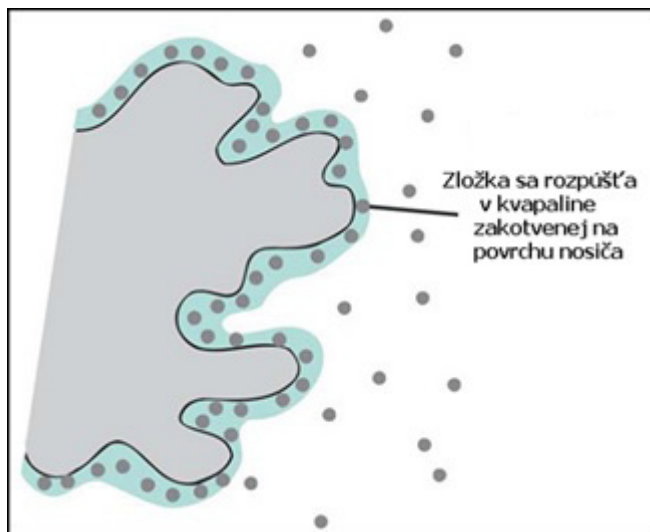
Obrázok 9-7 Vznik vodíkových väzieb pri delení benzénu a jeho hydroxyderivátov na silikagéli metódou LSC. Hydrochinón (1,4) reaguje súčasne s dvoma aktívnymi miestami adsorbentu, zatiaľ čo pyrokatechol (1,2) len s jedným. V dôsledku toho je *o*-izomér slabšie zadržávaný na kolónke a eluuje sa skôr ako *p*-izomér. Samotný benzén nevytvára vodíkové väzby so silikagélom a postupuje kolónou najrýchlejšie. (Kačík a kol. 2012)



Obrázok 9-8 Schematické znázornenie adsorpčnej chromatografie (<http://www.und.edu/dept/chromatography/documents/Chromatography.pdf>, upravené)

Rozdeľovacia chromatografia (GLC, LLC)

Táto metóda je založená na mechanizme rozdeľovania zložiek medzi mobilnou a kvapalnou stacionárnou fázou. Ak je mobilná fáza v plynnom skupenstve, ide o plynovú rozdeľovaciu chromatografiu (GLC) a zložky sa delia na základe rôznej rozpustnosti v kvapalnej fáze. V prípade kvapalnej mobilnej fázy hovoríme o kvapalinovej rozdeľovacej chromatografii (LLC), kedy sa zložky delia medzi dve navzájom nemiešateľné kvapalné fázy. Tento proces je veľmi podobný procesu extrakcie kvapalín.



Obrázok 9-9 Schematické znázornenie rozdeľovacej chromatografie (<http://www.und.edu/dept/chromatography/documents/Chromatography.pdf>, upravené)

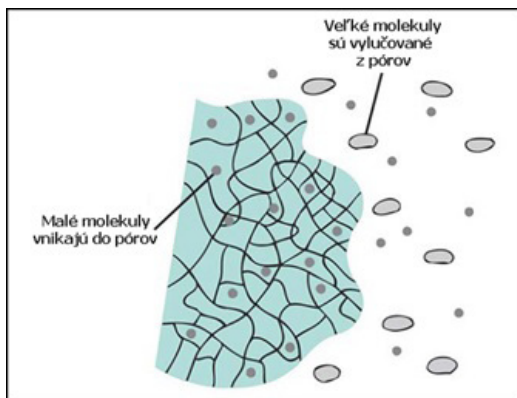
Gélová permečná chromatografia (GPC)

Táto chromatografická metóda separuje látky na základe tzv. *sietového efektu*. Častice sorbentu obsahujú póry so známymi rozmermi a tieto póry sú zaplnené tzv. *stagnujúcou mobilnou fázou*, t.j. mobilnou fázou, ktorá sa nepohybuje. Objem stagnujúcej mobilnej fázy v kolóne zodpovedá objemu pórov a značí sa V_i . Pri delení vzorky využívajú jej najmenšie molekuly najväčšiu časť stagnujúcej mobilnej fázy, väčšie molekuly využívajú len časť pórov a všetky molekuly, ktorých priemer je väčší ako vstupný otvor pórov, vychádzajú z kolóny s elučným objemom rovnakým ako je objem mobilnej fázy v priestore medzi časticami sorbentu (tzv. *intersticiálny objem* V_0). Posledný uvedený prípad sa označuje ako *totálna exklúzia*. Elučný objem akejkoľvek molekuly v gélovej permečnej chromatografii je daný rovnicou:

$$V_R = V_0 + K_D \cdot V_i \quad [9.9]$$

kde K_D je formálna obdoba distribučnej konštanty, ktorej hodnota leží v intervale 0 až 1. Pokiaľ by hodnota K_D dosiahla vyššiu hodnotu, znamená to, že v systéme dochádza k uplatneniu ďalších mechanizmov, napr. k adsorpcii.

Súčasná predstava o tvare pórov predpokladajú, že póry sú pomerne nepravidelné a že rozhodujúcim kritériom nie je objem pórov, ale dostupnosť častí jednotlivých pórov a distribúcia veľkostí všetkých pórov v gélovej matici.

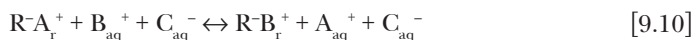


Obrázok 9-10 Schematické znázornenie gélovej permeačnej chromatografie (<http://www.und.edu/dept/chromatography/documents/Chromatography.pdf>, upravené)

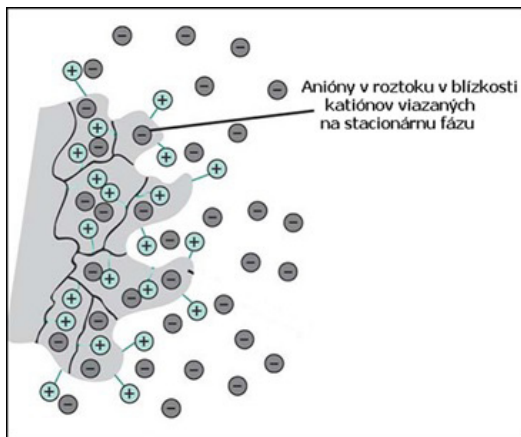
Rozhodujúcim parametrom pre separáciu zložiek pomocou gélovej permeačnej chromatografie je hydrodynamický priemer molekuly, čo je priemer gule, ktorú opíše molekula pri voľnej rotácii v priestore.

Iónovú výmennú chromatografiu (IC)

Iónovú výmennú chromatografiu môže byť charakterizovaná ako výmenná adsorpcia. Sorbent zachytáva určitý druh iónov a namiesto nich uvoľňuje do roztoku iný ión. Väčšina týchto procesov prebieha vo vodných roztokoch a ich podstatou sú chemisorpčné reakcie:



kde R^- predstavuje fixované iónové miesto na vymieňači iónov, A_r^+ – potenciálne zameniteľný protiión, $B_{aq}^+ + C_{aq}^-$ – úplne disociovanú iónovú zlúčeninu (zložku BC). Ión B^+ je na vymieňači iónov zadržaný, zatiaľ čo ión A^+ prechádza do mobilnej fázy. Ióny A^+ , B^+ , C^- sú v chromatografickom systéme pohyblivé, ión R^- je pevne viazaný.



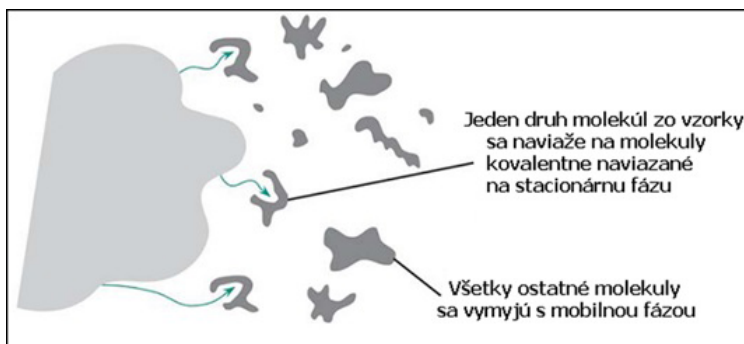
Obrázok 9-11 Schematické znázornenie iónovú výmennej chromatografie (<http://www.und.edu/dept/chromatography/documents/Chromatography.pdf>, upravené)

Afinitná chromatografia

Je určená na separáciu biologických makromolekúl, ktoré možno inak len veľmi ťažko separovať, pretože rozdiely vo fyzikálno-chemických vlastnostiach týchto látok sú veľmi malé. Afinitná chromatografia je založená na tom, že na nosič je naviazaný kovalentnou väzbou vhodný ligand, ktorý je schopný vytvárať špecifický komplex s určitou biologickou makromolekulou.

Do kolóny, ktorá je naplnená takto pripravenou stacionárnou fázou, sa nanesie roztok vzorky a po premytí zostáva určitý druh biomolekúl viazaný na kolóne, zatiaľ čo ostatné zložky vzorky sú vymyté. Vytvorený komplex je reverzibilný a pri použití vhodného tlmivého roztoku alebo rozpustného protiligandu možno viazané biomolekuly z komplexu uvoľniť. Kolóna je potom pripravená na ďalšiu separáciu.

Ako nosiče pre naviazanie ligandu sa používajú častice, ktorých základom sú polysacharidy (celulóza, agaróza, zosieťovaný dextrán), zosieťovaný polyakrylamid, príp. pórovité sklá. Ako ligandy slúžia napr. špecifické inhibítory, na ktorých možno separovať enzýmy, ďalej lektíny, na ktorých sa rozdeľujú rôzne glykoproteíny a nukleové kyseliny (takto je napr. možné izolovať m-RNA), atď.



Obrázok 9-12 Schematické znázornenie afinitnej chromatografie (<http://www.und.edu/dept/chromatography/documents/Chromatography.pdf>, upravené)

9.1.2.3.

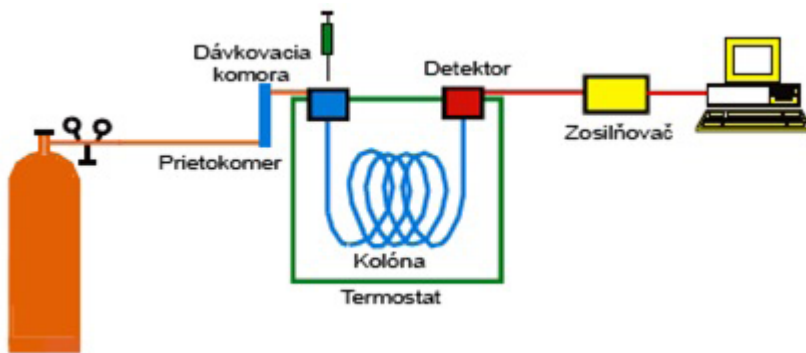
Plynová chromatografia

Plynová chromatografia je separačná metóda, ktorá využíva na separáciu plynov a pár dve heterogénne fázy. Mobilnou fázou je inertný plyn. Stacionárnou fázou je najčastejšie kvapalina zakotvená na inertnom nosiči, menej často povrchovo aktívny adsorbent.

V *klasicknej plynovej chromatografii* sa na separáciu zložiek používajú kolóny naplnené vhodnou chromatografickou náplňou, dnes sa však používa len výnimočne. V *kapilárnej plynovej chromatografii* sa vzorky separujú v kapilárnych kolónach najčastejšie s filmom kvapalnej fázy zakotveným (fyzikálne alebo chemicky) na vnútorných stenách kapilárnej kolóny. Kapilárne kolóny vykazujú podstatne vyššiu separačnú účinnosť a rozlišovaciu schopnosť ako náplňové kolóny a preto sa tento typ chromatografie charakterizuje ako vysokorozlišovacia plynová chromatografia, pričom sa používa skratka HRGC (high resolution gas chromatography).

Každý plynový chromatograf je kombináciou *pneumatického systému*, ktorý slúži na dopravu pracovných plynov – nosného, obslužného a plynov pre detektor pri požadovanom tlaku a prietoku, *teplotného systému*, ktorý zabezpečuje obsluhu termostatu a vyhrievaných zón pre dávkovač a detektor, a *elektronického systému*, ktorý riadi synchronizáciu činnosti všetkých častí chromatografu, a tiež zabezpečuje meranie a spracovanie signálu detektora. Plynový chromatograf sa skladá z nasledujúcich hlavných častí (obr. 9-13):

- zásobník plynnej fázy,
- zariadenie na reguláciu tlaku, resp. prietoku plynnej fázy,
- dávkovacie zariadenie, chromatografickú kolónu,
- termostat so zariadením na izotermickú analýzu a na analýzu s programovane sa meniacou teplotou,
- detektor,
- zariadenie na spracovanie signálu detektora a jeho záznam,
- zariadenie na vyhodnotenie analýzy.



Obrázok 9-13 Schéma plynového chromatografu (Koller 2002)

Činnosť plynového chromatografu možno zjednodušene popísať nasledovne. Z tlakovej fľaše prechádza nosný plyn redukčným ventilom do regulátora tlaku, resp. regulátora prietoku. Vzorka sa nadávkuje do prúdu nosného plynu v injektore (dávkovacia komora) a je plynom vnesená do chromatografickej kolóny, kde sa rozdelí na zložky, ktoré sú nosným plynom postupne vymývané do detektora, ktorého signál sa spracuje a zosilní, zaznamená na záznamové zariadenie a vyhodnotí príslušným programom. Teplotu injektora, detektora a kolóny regulujú teplotné regulátory. Väčšina plynových chromatografov dávkuje vzorky prostredníctvom automatického dávkovača, celý chod zabezpečuje mikroprocesor a analýza sa vyhodnocuje pomocou špeciálneho programu na počítači. Z výsledku analýzy možno získať informácie o kvalitatívnom a kvantitatívnom zastúpení zložiek vzorky, o separačnej účinnosti chromatografického systému, o pomere signálu k šumu atď.

Mobilnou fázou v plynovej chromatografii je spravidla inertný plyn. Pretože mobilná fáza sa zúčastňuje na prenose látok kolónou, zaužíval sa pre ňu názov *nosný plyn*. Voľbu nosného plynu ovplyvňujú viaceré faktory. Jedným z rozhodujúcich je typ použitého detektora. Medzi ďalšie patrí inertnosť, čistota, bezpečnosť pri práci, viskozita a hustota. Zásobníkom nosného plynu sú zvyčajne tlakové fľaše alebo laboratórne generátory

plynov. Ako nosné plyny sa v praxi najčastejšie používajú: dusík, vodík, hélium a argón. Pre špeciálne typy detekcie sa vyžaduje až 99,999% (tzv. 5-deviatková) čistota nosného plynu, v prípade použitia detektora elektrónového záchytu je potrebné použiť nosný plyn čistoty ECD.

Okrem samotnej separácie analyzovaných látok na kolóne je dôležitou súčasťou analýzy ich detekcia.

V plynovej chromatografii možno úspešne využiť viaceré detektory, napr.:

- *plameňovoionizačný detektor* (Flame Ionization Detector – FID) – na analýzu väčšiny organických látok,
- *detektor elektrónového záchytu* (Electron Capture Detector – ECD) – selektívny na zlúčeniny obsahujúce atómy halogénov, fosforu, síry, olova, kyslíka, nitrozlúčeniny a aromatické uhľovodíky,
- *plameňovofotometrický detektor* (Flame Photometric Detector – FPD) – citlivý na síru a fosfor, ale reguláciou podmienok plameňa sa dosiahne odozva aj na ďalšie heteroatómy pri analýze látok obsahujúcich atómy P, S, N a As,
- *hmotnostne spektrometrický detektor* (MSD) – umožňuje kvantitatívnu aj kvalitatívnu analýzu organických látok, veľmi vhodný pre identifikáciu a stanovenie zvyškov po horľavinách,
- *detektor využívajúci infračervenú spektrometriu s Fourierovou transformáciou* (FTIR) – vhodný pre identifikáciu vzoriek, napr. pre produkty termického rozkladu polymérov.

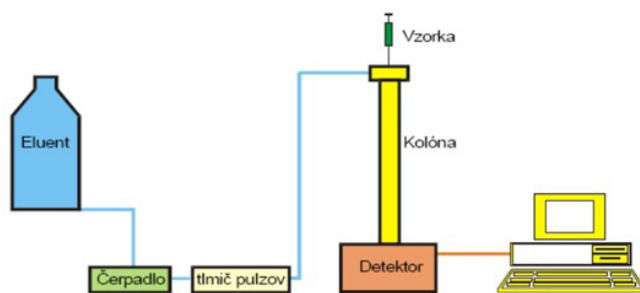
Na spracovanie získaných údajov sa používa špecializovaný program a PC. Program je schopný zaznamenávať súčasne signály z viacerých detektorov (napr. aj z viacerých chromatografov) a možnosti spracovania získaných dát sú veľmi rozsiahle. Okrem toho je aj schopný riadiť príslušný chromatograf (aj viac chromatografov súčasne).

9.1.2.4.

Kvapalinová chromatografia

Pre všetky metódy kvapalinovej chromatografie je typické, že mobilnú fázu tvorí kvapalina. Plynovou chromatografiou s ohľadom na prchavosť a tepelnú stabilitu je možné analyzovať približne 20% dnes známych zlúčenín, na kvapalinovú chromatografiu pripadá celých 80% všetkých ostatných zlúčenín, najmä organického charakteru. V podmienkach ionexovej chromatografie sa analyzujú aj veľmi komplikované zmesi anorganických kationov a aniónov. Hlavnou výhodou kvapalinovej chromatografie je to, že na delenie látok je možné využiť všetky vratné dvojfázové separačné mechanizmy, ako je adsorpcia, chemisorpcia, výmena iónov, rozdeľovanie medzi dve nemiešateľné kvapaliny alebo prenikanie molekúl z voľnej mobilnej fázy do rovnakej kvapalnej fázy, ktorá je uzavretá v póroch pevnej stacionárnej fázy (napr. pri gélovej chromatografii). Táto široká škála mechanizmov poskytuje možnosť nájsť dostatočne selektívny a účinný chromatografický systém, ktorým je možné dosiahnuť potrebné rozlíšenie.

Kvapalinová chromatografia používa kolóny s malým priemerom častíc náplne a vysokou hustotou plnenia, ktoré vyžadujú pomerne vysoké tlaky na prácu pri optimálnej rýchlosti mobilnej fázy. Schematické znázornenie prístroja pre kvapalinovú chromatografiu je na obr. 9-14.

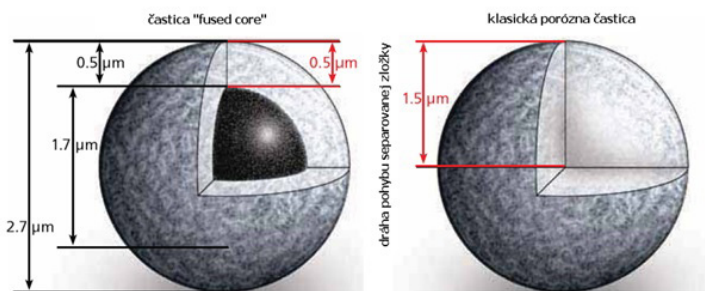


Obrázok 9-14 Schéma kvapalinového chromatografu (Koller 2002)

Základnými súčasťami kvapalinového chromatografu sú:

- zásobník mobilnej fázy,
- čerpadlo (pumpa),
- zariadenie na meranie pracovného tlaku,
- dávkovacie zariadenie (injektor),
- chromatografická kolóna,
- detektor,
- vyhodnocovacie zariadenie.

Kolóny v kvapalinovej chromatografii sú plnené malými časticami sorbentu (3 až 10 μm). Najnovším trendom sú tzv. *fused core* častice, ktoré obsahujú jadro, čím sa znižuje dráha separovanej zložky. Účinnosť je dvojnásobná oproti konvenčným 3 μm časticám a tlak je polovičný ako pri časticách menších ako 2 μm .



Obrázok 9-15 Porovnanie častíc v kvapalinovej chromatografii (www.sigmaaldrich.com, upravené)

V kvapalinovej chromatografii sa používajú rôzne typy detektorov, najmä fotometrický, fluorimetrický, refraktometrický, elektrochemický a vodivostný. Podobne ako v plynovej chromatografii, existuje priame spojenie kvapalinovej chromatografie s hmotnostnou spektrometriou (HPLC-MS).

9.1.2.5.

Aplikácie chromatografických metód

Pri výbere vhodnej analytickej metódy na riešenie problému si treba uvedomiť, že samotná chromatografia je len separačná metóda a na komplexné spracovanie vzoriek

je potrebná vhodná detekcia rozdelených látok. Pri voľbe metódy treba teda vhodné skombinovať typ chromatografie (plynová, kvapalinová) aj detekcie. V súčasnosti je najuniverzálnejšie spojenie buď plynovej alebo kvapalinovej chromatografie s hmotnostnou spektrometriou (GC-MS, HPLC-MS), ktorá spája účinnú separačnú schopnosť s možnosťou identifikácie jednotlivých látok.

Chromatografické metódy umožňujú identifikovať a stanoviť takmer všetky známe zlúčeniny v širokom koncentračnom rozmedzí, preto ich použitie je veľmi rozsiahle. Chromatografia sa používa pri kontrole životného prostredia na analýzu organických rozpúšťadiel (VOC), herbicídov, pesticídov, polycyklických aromatických uhľovodíkov (PAH), polychlórovaných bifenylov (PCB), aniónov, kationov a mnoho ďalších a to v ovzduší, v pôde, vo vode, v potravinách, v rastlinách a pod.). Používa sa aj na analýzu najrôznejších látok v telových tekutinách (krv, moč) – hormónov, steroidov, liečiv a ich metabolitov a pod., v potravinárstve na sledovanie čistoty výrobkov, na stanovenie prítomných vitamínov a pod., v biológii a biochémií pri analýzach bielkovín a nukleových kyselín a v ďalších oblastiach biochemických analýz a v celom rade ďalších priemyslových odvetví, v poľnohospodárstve, v stavebníctve, v elektrotechnike, všade, kde je treba sledovať buď čistotu surovín a preparátov alebo migráciu určitých preparátov v prostredí (herbicídov v pôde, v rastlinách), príp. vykonávať hygienickú (zdravotnú) kontrolu finálnych výrobkov alebo sledovať v nich určité zložky.

9.1.2.6.

Využitie chromatografie na stanovenie zvyškov po horľavých kvapalinách

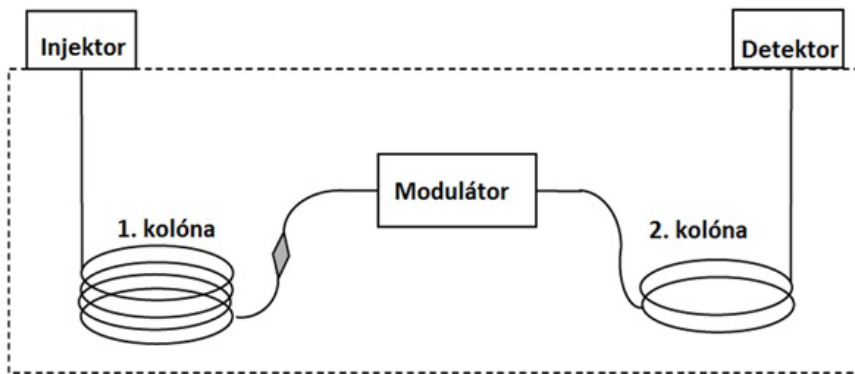
Požiare spôsobujú značné škody na majetku a zdraví, často pri nich dochádza k stratám na ľudských životoch. V prípade úmyselného podpaľačstva sa jedná o trestné činy a preto metódy na zisťovanie príčin požiarov musia byť dostatočne citlivé, presné a spoľahlivé. Horľavé kvapaliny predstavujú z analytického hľadiska komplikovaný systém pozostávajúci z veľkého množstva jednotlivých zložiek, ktoré treba vo zvyškoch po požiari separovať a identifikovať. Vysokorozlišovacia kapilárna plynová chromatografia v spojení s hmotnostným detektorom (GC-MS) poskytuje množstvo cenných informácií, výsledky v niektorých prípadoch nemusia byť jednoznačné. Komplikované zmesi chemických zlúčenín, ktoré sa nachádzajú v horľavých kvapalinách je však možné analyzovať pomocou tzv. komprehenzívnej (dvojrozmernej) plynovej chromatografie (GC×GC).

Komprehenzívna (dvojrozmerná) plynová chromatografia (GC×GC)

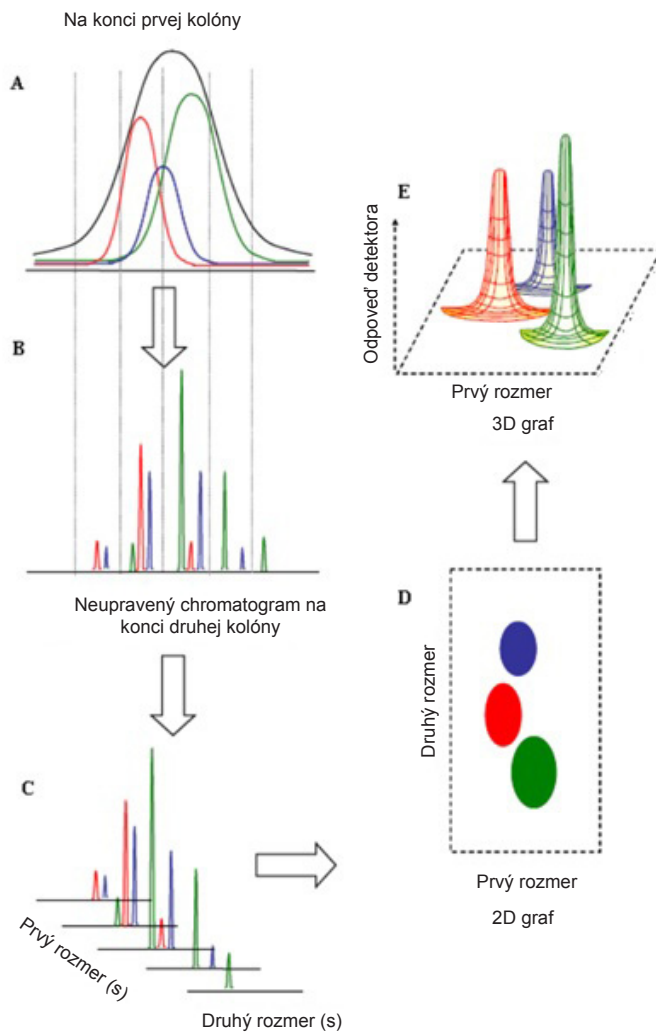
Komprehenzívna (dvojrozmerná) plynová chromatografia (GC×GC) je veľmi výhodná pri analýze komplexných vzoriek, napríklad benzínu, respektíve ropy, látok znečisťujúcich životné prostredie, parfumov, aromatických látok, vzoriek tabaku a vzoriek pri vyšetrovaní podpaľačstva, ak sa nedá použiť bežná plynová chromatografia. Umožňuje separáciu látok, ktoré sa v bežnej plynovej chromatografii nedajú rozlíšiť a ich signály na chromatograme sa prekrývajú. Pôvodná horľavá kvapalina sa dá pomerne ľahko identifikovať aj jednorozmernou plynovou chromatografiou. Situácia je podstatne zložitejšia v prípade, keď sa analyzujú zvyšky horľavých kvapalín vo zvyškoch po požiaroch. Analýzu komplikuje prítomnosť matrice (pôda, textilné látky apod.), prítomnosť nečistôt, čiastočné odparenie

zápalnej látky, nízka koncentrácia zvyškov, atď. V takýchto prípadoch poskytuje GC×GC chromatografia ďalšie cenné informácie.

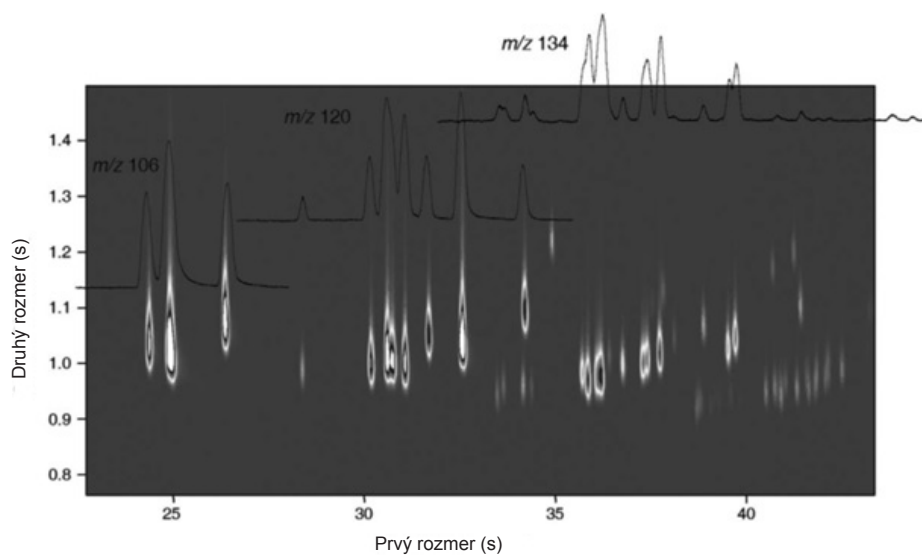
Plynový chromatograf pre GC×GC analýzu je schematicky znázornený na obr. 9-16. V hlavnom termostate sa nachádzajú dve kolóny s rôznou separačnou selektivitou. Prvá kolóna je zvyčajne dlhšia a nepolárna (rozdeľuje látky podľa bodu varu), druhá kolóna je krátka a polárna (rozdeľuje látky na základe polarity). Obidve kolóny sú spojené tzv. modulátorom, ktorý striedavo ochladzuje kvapalným dusíkom kolónu a tým najskôr zachytáva eluent v prvej kolóne a potom ho púšťa do druhej kolóny, kde dochádza k veľmi rýchlej separácii. Na detekciu látok sa používa buď kvadrupólový hmotnostný detektor (MS) alebo prieletový analyzátor (TOF – Time of Flight) (Adahchour 2006, Pert a kol. 2006 a Wang a kol. 2010).



Obrázok 9-16 Schematické znázornenie (GC×GC) chromatografu



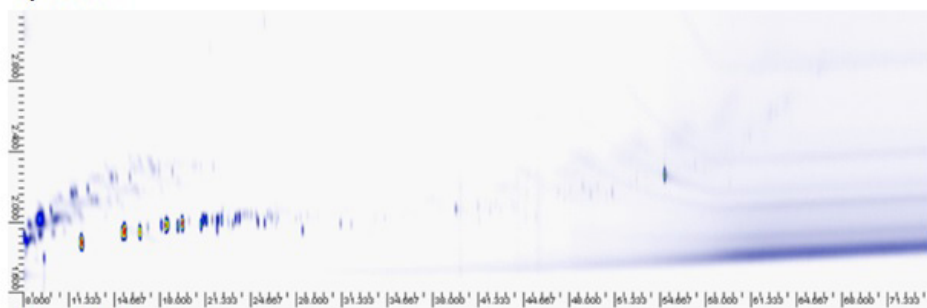
Obrázok 9-17 Znáznornenie separácie nerozdelených píkav pomocou (GC×GC) chromatografie (Kallio 2008)



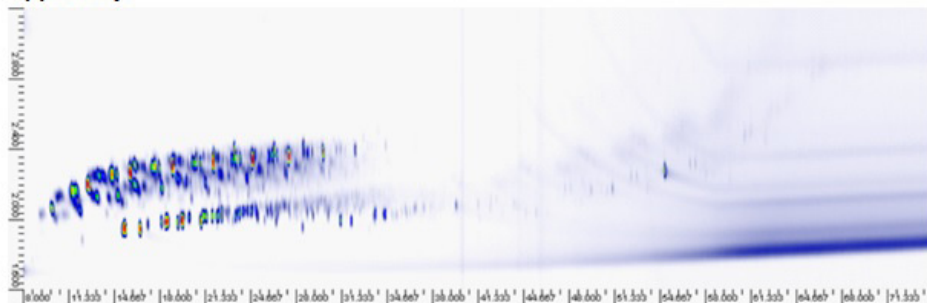
Obrázok 9-18 Detailný záznam vybranej časti (GC×GC) analýzy benzínu a jej porovnanie s jednorozmernou plynovou chromatografiou (Stauffer a kol. 2008)

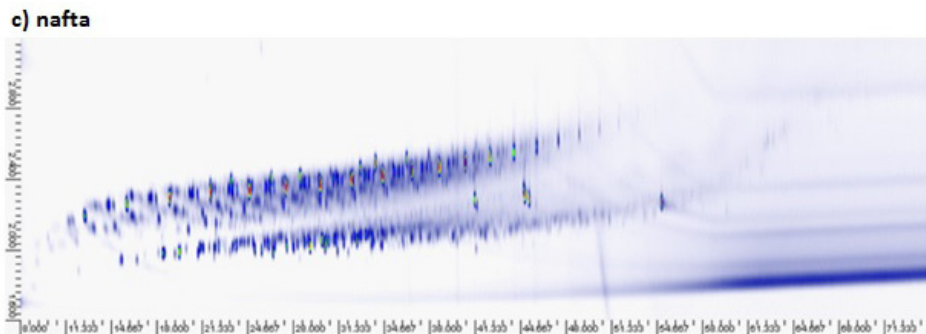
Na obr. 9-19 sú porovnané (GC×GC) záznamy rôznych horľavých kvapalín (Taylor a kol. 2012).

a) benzín



b) petrolej





Obrázok 9-19 (GC×GC) záznamy rôznych horľavých kvapalín (Taylor a kol. 2012)

Dvojmerná plynová chromatografia je v súčasnosti najvhodnejšia metóda na analýzu komplikovaných zmesí organických rozpúšťadiel a je ideálna pre zisťovanie príčin vzniku požiarov. Umožňuje získať „otlačok prsta“ zápalnej látky vo forme GC×GC vrstevnicového grafu a v spojení s TOF-MS detekciou poskytuje široké možnosti identifikácie neznámych látok.

9.2.

Analýza elektrických vodičov

Podľa Dvořáka a kol. (2011) sú na skúmanie parametrov natavených častí vodičov elektroinštalácie vhodné nasledovné metódy:

- optická mikroskopia,
- elektrónová mikroskopia,
- energiovo disperzná röntgenová spektrometria,
- röntgenová difrakčná analýza,
- infračervená spektroskopia,
- Ramanova spektroskopia.

Uvedené metódy slúžia na rozlíšenie medzi primárnym a sekundárnym skratom. Ako primárny sa označuje taký skrat, od ktorého vznikol požiar. Sekundárny skrat je taký, ktorý vznikol následkom požiaru. Rozlíšenie medzi primárnym a sekundárnym skratom je založené na rozdielnosti podmienok v ktorých vznikli. Primárny skrat vzniká obyčajne pri nižšej teplote okolia (v porovnaní s teplotou požiaru) a atmosfére s obsahom kyslíka 20,95 obj. %. Sekundárny skrat vzniká naopak pri vyššej teplote (ako je bežná teplota okolia) a v atmosfére s nižšou koncentráciou kyslíka ako 20,95 obj. % (obyčajne pri koncentrácii kyslíka medzi 5 až 20 obj. %).

Dvořák a kol. (2011) považujú za charakteristické znaky, ktoré s určitou pravdepodobnosťou umožňujú rozlíšenie medzi primárnym a sekundárnym skratom medeneho vodiča obsah kyslíka v natavenej časti, kontaminácia povrchu natavenej časti a vzdialenosť vetiev dendritov. V prípade hliníkových vodičov súčasný stav poznania neumožňuje rozlíšenie medzi primárnym a sekundárnym skratom s dostatočnou mierou spoľahlivosti.

Prítomnosť eutektika $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$ v natavenej časti znamená, že roztavená meď bola v styku s atmosférou obsahujúcou kyslík. Je možné očakávať, že čím je obsah kyslíka (eutektika) v natavenej časti vyšší, tým lepšie podmienky boli pre jeho absorpciu v roztavenej

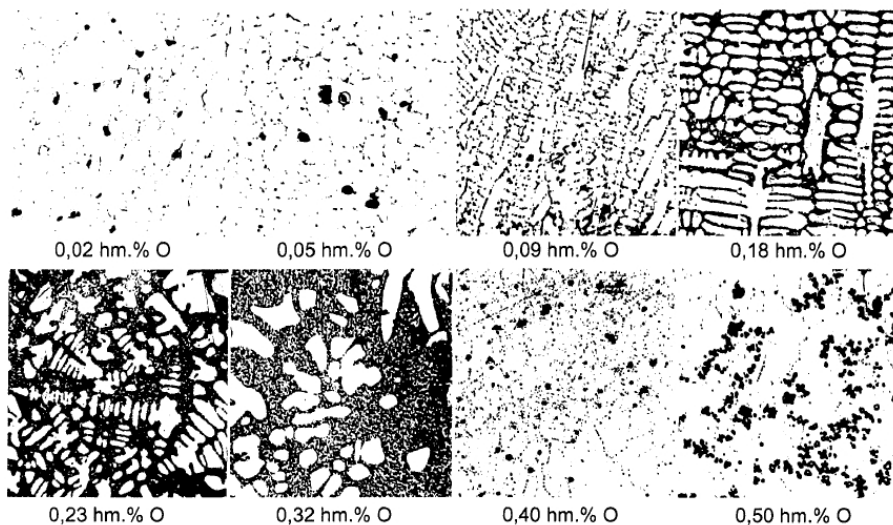
medi – tzn. tým vyššia bola teplota roztavenej medi, doba jej existencie a obsah kyslíka v okolitej atmosfére. Vo vykonaných experimentoch bolo eutektikum $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$ nájdené len u primárnych skratov realizovaných na vzduchu. V prípade primárnych skratov realizovaných v dusíku a u primárnych skratov medzi izolovanými vodičmi v peci nebolo (s výnimkou jedného prípadu) eutektikum nájdené. Z uvedených výsledkov vyplýva, že v prípade prítomnosti významného množstva eutektika (hlavne v natavených častiach s malými rozmermi) sa jedná o primárny skrat (skrat medzi obnaženými vodičmi s dobrým prístupom okolitého vzduchu). Tento záver je však potrebné aplikovať mimoriadne opatrne a vždy s ohľadom na podmienky konkrétneho požiaru. Dôvodom je, že modelové experimenty so sekundárnymi skratmi boli vykonané v uzatvorenej peci, kde následkom horenia polymérnej izolácie došlo k rýchlemu zníženiu koncentrácie kyslíka v atmosfére. V reálnych podmienkach však môže byť požiar dostatočne odvetraný, takže aj natavené časti zo sekundárnych skratov môžu obsahovať určité množstvo kyslíka. Na druhej strane, ak je skratová guľôčka veľká a dobre vyvinutá s hrubou štruktúrou a napriek tomu v nej nie je prítomné žiadne eutektikum, je možné s istou mierou pravdepodobnosti usudzovať na sekundárny skrat vzniknutý následkom požiaru až po vyhorení izolácie vodiča (obmedzený prístup kyslíka). Aj tento záver však musí byť aplikovaný mimoriadne opatrne (Dvořák a kol. 2011).

Analýza kontaminácie povrchu nataveného miesta pre rozlíšenie primárneho a sekundárneho skratu je podľa niektorých autorov (napr. Chen a kol. 2003 a Dvořák a kol. 2011) sľubnou metódou, ale vyžaduje si náročné prístrojové vybavenie. Kontaminácia natavenej časti napr. uhlíkom, chlórrom apod. by mala byť vyššia v prípade sekundárneho skratu (Chen a kol. 2003) u ktorého bola roztavená časť dlhší čas v styku so splodinami horenia PVC izolácie. Takáto kontaminácia však môže byť prítomná aj v primárnych skratoch, pričom jej zdrojom môžu byť organické látky alebo PVC izolácia vodiča z jeho okolia. Pre detailné rozlíšenie by bolo potrebné vykonať analýzu nie len samotného povrchu, ale tiež stanovenie koncentračného profilu uhlíka a chlóru vo veľmi tenkej submikrónovej povrchovej vrstve natavenej časti. Vo vedeckej práci Chena a kol. (2003) bolo dokázané, že tieto profily sa u oboch typov skratov významne líšia. Bolo zistené, že v natavených častiach z primárnych skratov je prítomná len tenká vrstva obohatená uhlíkom a chlórrom, zatiaľ čo v natavenej časti zo sekundárnych skratov je povrchová vrstva obohatená týmito prvkami výrazne hrubšia. Na vykonanie uvedenej analýzy je však potrebná pomerne náročná experimentálna technika (napr. röntgenová fotoelektrónová spektroskopia) (Dvořák a kol. 2011).

Tretí parameter pre rozlíšenie medzi primárnym a sekundárnym skratom – vzdialenosť vetiev dendritov vychádza z toho, že pri primárnom skrate roztavená meď tuhe pri relatívne nižšej teplote okolia (do približne $400\text{ }^\circ\text{C}$), ako v prípade skratu sekundárneho (nad $500\text{ }^\circ\text{C}$) (Lee a kol. 2000). To znamená, že primárne skraty majú vyššiu rýchlosť ochladzovania a teda aj jemnejšiu štruktúru a menšiu vzdialenosť vetiev dendritov ako skraty sekundárne. Vo vedeckej práci Lecho a kol. (2000) boli zistené vzdialenosti vetiev primárnych dendritov medi pre teploty okolia do $400\text{ }^\circ\text{C}$ (primárny skrat) do približne $5\text{ }\mu\text{m}$. Pre vyššie teploty okolia (sekundárny skrat) až do $22\text{ }\mu\text{m}$. Vo vedeckej práci Vojtěcha (2007) boli pre primárne skraty realizované na vzduchu stanovené vzdialenosti vetiev dendritov v rozmedzí od 7 do $26\text{ }\mu\text{m}$. Výsledky vedeckej práce Vojtěch (2007) sú teda v rozpore s výsledkami vedeckej práce Lecho a kol. (2000). Príčinou boli pravdepodobne rozdielne podmienky experimentu. S určitou mierou pravdepodobnosti je však možné predpokladať, že ak v dobre vyvinutej a na kyslík bohatej natavenej časti sú prítomné

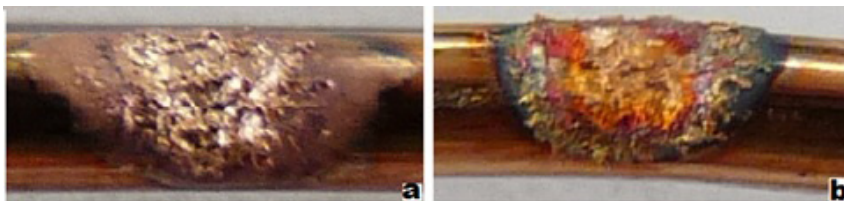
veľmi jemné dendrity primárnej medi (vzdialenosť vetví do približne 10 μm), jedná sa o primárny skrat (Dvořák a kol. 2011).

Štruktúru zliatin Cu-O s odstupňovaným obsahom kyslíka (od 0,02 hmot. % do 0,5 hmot. %) ilustruje obr. 9-20.

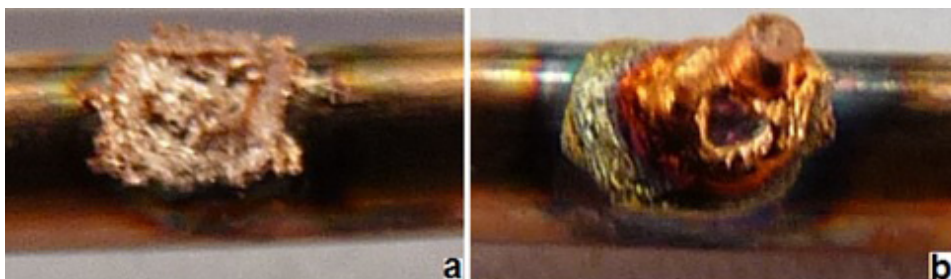


Obrázok 9-20 Štruktúra zliatiny Cu-O s variabilným obsahom kyslíka (Lyman 1973 a Dvořák a kol. 2011)

Na tomto mieste je však potrebné upozorniť, že pri rozlišovaní primárneho a sekundárneho skratu na základe vyššie popísaný metód, je potrebné zachovať mimoriadne vysokú mieru opatrnosti. Nakoľko napriek skutočnosti, že výskumu v tejto oblasti sa venuje úsilie pomerne dlhú dobu, stále nebol exaktne kvantifikovaný vplyv všetkých vonkajších faktorov. Jedným z uvedených faktorov je napr. rýchlosť prúdenia vzduchu (splodín horenia) okolo natavenej časti v okamihu vzniku skratu. Vplyv koncentrácie kyslíka a rýchlosti prúdenia plynov na vizuálny vzhľad miesta skratu medených vodičov ilustrujú obr. 9-21 a 9-22. Z obr. 9-21 vyplýva, že na mieste vzniku skratu (natavenej časti) v atmosfére dusíka nie sú prítomné vizuálne pozorovateľné znaky oxidácie, zatiaľ čo na mieste skratu v atmosfére kyslíka došlo k silnému zoxidovaniu medi. Tento výsledok bol vo všeobecnosti očakávaný, ale zaujímavejšie výsledky prezentuje obr. 9-22. Z citovaného obr. vyplýva, že na rozsah oxidácie (vyhodnotený na základe vizuálneho pozorovania) má významný vplyv rýchlosť prúdenia oxidačnej zmesi. Na tomto mieste je potrebné upozorniť, že za podmienok reálneho požiaru je prakticky vylúčené spätne odhadnúť rýchlosť prúdenia s presnosťou na 0,05 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obrázok 9-21 Detailný pohľad na miesto vzniku skratu na krajnom vodiči v atmosfére a) dusíka a b) kyslíka (Martinka 2012)



Obrázok 9-22 Detailný pohľad na miesto vzniku skratu na krajnom vodiči v dusíkovo-kyslíkovej atmosfére s koncentráciou kyslíka 9 obj. % pri rýchlostou prúdenia a) $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a b) $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Martinka 2012)

10

Požiarotechnické vlastnosti látok a ich využitie v procese zisťovania príčin vzniku požiarov

Požiarotechnické vlastnosti látok je možné definovať, ako vlastnosti látok, ktoré popisujú ich správanie sa za podmienok reálneho požiaru. Najjednoduchšie rozdelenie je podľa skupenstva horľavej látky na požiarotechnické vlastnosti tuhých (v kompaktnej a prášnej forme), kvapalných a plyných látok. Praktickejšie delenie je podľa fázy rozvoja požiaru v ktorej hodnotia správanie sa materiálu. Podľa tohto kritéria sa požiarotechnické vlastnosti látok delia na:

1. požiarotechnické vlastnosti hodnotiace správanie sa látky vo fáze iniciácie (teplota vznietenia, teplota vzplanutia, bod vzplanutia, teplota horenia a kritická hustota tepelného toku),
2. požiarotechnické vlastnosti hodnotiace správanie sa látky vo fáze lineárneho rozvoja požiaru (rýchlosť šírenia plameňa po povrchu),
3. požiarotechnické vlastnosti hodnotiace sklon látky k propagácii požiaru vo fáze flashover,
4. požiarotechnické vlastnosti hodnotiace správanie sa látky vo fáze plne rozvinutého požiaru (napr. požiarová odolnosť konštrukcií),
5. požiarotechnické vlastnosti hodnotiace správanie sa látky počas celej doby rozvoja požiaru (napr. rýchlosť uvoľňovania tepla, rýchlosť tvorby dymu, toxicita spodín horenia a pod.),
6. požiarotechnické vlastnosti pre zvláštne účely (napr. limitné kyslíkové číslo).

Podľa Osvalda a kol. (2009) existuje v súčasnosti niekoľko sto normalizovaných a niekoľko tisíc nenormalizovaných skúšok používaných na posúdenie požiarotechnických vlastností látok. Cieľom tejto kapitoly nie je poskytnúť vyčerpávajúci popis všetkých v súčasnosti používaných požiarotechnických vlastností horľavých látok a ani popis samotných skúšobných metód, ale poskytnúť informácie týkajúce sa využitia požiarotechnických vlastností látok pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov. Takéto požiarotechnické vlastnosti sa nazývajú požiarotechnické vlastnosti pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov.

Prakticky každá požiarotechnická charakteristika môže byť viac alebo menej využitá pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov. Za kľúčové požiarotechnické charakteristiky pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov sa považujú:

1. **iniciačné charakteristiky** (teplota vzplanutia a teplota vznietenia tuhých látok, bod vzplanutia a bod horenia horľavých kvapalín, kritická hustota tepelného toku tuhých a kvapalných horľavých látok, teplota vznietenia plynov a pár horľavých kvapalín a minimálna teplota vznietenia prachov),
2. **medze výbušnosti** (koncentračná a teplotná) horľavých plynov, kvapalín a prachov,
3. **trieda reakcie na oheň** stavebných výrobkov,
4. **rýchlosť uvoľňovania sprievodných javov požiaru** (rýchlosť uvoľňovania tepla, oxidu uhoľnatého a dymu),

5. **sklon tuhej látky k propagácii požiaru vo fáze flashover,**
6. **požiarnotechnické charakteristiky pre špeciálne použitie** pri zisťovaní príčin vzniku požiarov (napr. limitné kyslíkové číslo).

10.1.

Iniciačné charakteristiky

Základnou skupinou požiarnotechnických charakteristík pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov sú iniciačné charakteristiky, nakoľko tieto umožňujú posúdenie, či mohla byť určitá látka zapálená konkrétnym iniciačným zdrojom. Medzi základné iniciačné charakteristiky patrí teplota vznietenia, teplota vzplanutia, bod vzplanutia, bod horenia, teplota vznietenia horľavých plynov a pár horľavých kvapalín a minimálna teplota vznietenia prachov. Ďalšou základnou iniciačnou charakteristikou je kritická hustota tepelného toku tuhých a kvapalných horľavých látok.

Teplota vznietenia (tuhej látky) je definovaná, ako minimálna teplota vzduchu prúdiaceho okolo vzorky, ktorá spôsobí jej zapálenie bez pôsobenia prídavného zdroja iniciácie. **Teplota vzplanutia** je definovaná, ako minimálna teplota vzduchu prúdiaceho okolo vzorky, ktorá za súčasného pôsobenia prídavného zdroja zapálenia, ktorý pôsobí na jej rozkladné produkty (propánový plameň s dĺžkou 20 ± 1 mm) spôsobí jej zapálenie (ISO 871:2006).

Bod vzplanutia (horľavej kvapaliny) je definovaný, ako najnižšia teplota skúšanej látky, prepočítaná na štandardný atmosférický tlak 101,3 kPa, pri ktorej aplikovanie skúšobného plameňa spôsobí, že sa pary skúšaného množstva vzorky zapália a plameň sa rozšíri po povrchu kvapaliny za určených podmienok skúšky. **Bod horenia** (horľavej kvapaliny) je definovaný, ako najnižšia teplota skúšaného množstva vzorky, prepočítaná na štandardný atmosférický tlak 101,3 kPa, pri ktorej aplikácia skúšobného plameňa spôsobí, že sa pary zapália a ustálene horia počas minimálne 5 s za určených podmienok skúšky (EN ISO 2592:2001).

Teplota vznietenia pary horľavej kvapaliny alebo horľavého plynu je v zmysle STN EN 60079-20-1:2010 definovaná ako minimálna teplota (horúceho povrchu), pri ktorej za predpísaných podmienok skúšky dôjde ku vznieteniu horľavého plynu alebo pary horľavej kvapaliny v zmesi so vzduchom alebo vzduchom a inertným plynom.

Minimálna teplota vznietenia usadenej vrstvy prachu je v STN EN 50281-2-1:2002 definovaná ako minimálna teplota horúceho povrchu, pri ktorej dôjde k vznieteniu vrstvy prachu zo stanovenej hrúbky na tomto povrchu. **Teplotu vznietenia rozvíreného prachu** citovaná STN EN definuje ako najnižšiu teplotu horúcej vnútornej strany pece, pri ktorej dôjde k vznieteniu rozvíreného prachu vo vzduchu vnútri tejto pece.

Uvedené požiarnotechnické charakteristiky patria medzi základné a bežne stanovované. Pre potreby zisťovania príčin vzniku požiaru je potrebné aplikovať hodnoty uvedených požiarnotechnických charakteristík s vysokou mierou opatrnosti. V prípade teploty vzplanutia a vznietenia tuhých horľavých látok je potrebné brať do úvahy, že sa nejedná o teplotu samotnej horľavej látky, ale o teplotu vzduchu prúdiaceho okolo nej (teplota samotnej horľavej látky môže byť v čase iniciácie iná – obyčajne vyššia, ako je teplota vzduchu). Druhé významné obmedzenie sa týka času trvania skúšky a veľkosti vzorky. Štandardný čas trvania skúšky podľa ISO 871:2006 je 10 minút. Hmotnosť vzorky

je vo väčšine prípadov (pri jej hustote nad $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) $3 \pm 0,2 \text{ g}$. Za reálnych podmienok môže vplyvom vyššej hmotnosti vzorky a dlhšieho času pôsobenia zahrievania dôjsť k vzplanutiu alebo vznieteniu materiálu pri podstatne nižšej teplote, ako je teplota vzplanutia a vznietenia stanovená podľa ISO 871:2006.

Pri bode vzplanutia a bode horenia horľavých kvapalín je potrebné rozlišovať, či boli tieto stanovené v otvorenom alebo uzatvorenom téglíku. V závislosti od chemického zloženia horľavej kvapaliny môže byť bod vzplanutia (horenia) stanovený v otvorenom téglíku aj o niekoľko desiatok stupňov Celzia vyšší, ako bod vzplanutia (horenia) stanovený v uzatvorenom téglíku. Na tomto mieste je rovnako potrebné upozorniť, že pri pôsobení iniciačného zdroja s vysokou energiou (napr. otvorený plameň) alebo nasiaknutia horľavej kvapaliny do porézneho materiálu (napr. textil) je možné jej zapálenie aj pri podstatne nižšej teplote, ako je jej bod vzplanutia (horenia).

V prípade prachov má na ich minimálnu teplotu vznietenia usadenej vrstvy a teplotu vznietenia v rozvírenom stave vplyv ich frakčné zloženie (s klesajúcou veľkosťou častíc klesá teplota vznietenia), impregnácia chemickými látkami povrchu z ktorého prachové častice vznikli (napr. impregnácia povrchu dreva fermežou a pod.), hrúbka usadenej vrstvy, rýchlosť a charakter prúdenia vzduchu a ďalšie vlastnosti. Samostatnou kapitolou je vytváranie hybridných zmesí (zmes rozvíreného horľavého prachu a horľavého plynu alebo pary horľavej kvapaliny). V tomto prípade môže na iniciáciu takejto zmesi postačovať teplota, ktorá je nižšia ako teplota vznietenia plynu aj horľavého prachu.

Teplota vznietenia horľavého plynu, pary horľavej kvapaliny a rozvíreného prachu nemôže byť stotožnená s teplotou týchto látok, ale s teplotou horúceho povrchu, ktorý spôsobí ich iniciáciu. Táto hodnota môže byť za reálnych podmienok nižšia, ako hodnota stanovená počas laboratórnej skúšky. Príčinou je, že táto hodnota závisí od ďalších vlastností povrchu (nie len od jeho teploty), ale aj od plochy, orientácie, drsnosti, emisivity a ďalších vlastností.

Okrem toho majú na všetky iniciačné charakteristiky významný vplyv retardéry horenia.

Z uvedeného vyplýva, že pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov by sa nemalo pri posúdení možnosti iniciácie vychádzať z tabulkových údajov, ale v spornom prípade je potrebné dať stanoviť iniciačné charakteristiky konkrétnej látky do akreditovanej skúšobne. Okrem toho je potrebné zohľadniť všetky podmienky pôsobiace počas iniciácie, ktoré mohli mať vplyv na jej priebeh. Skúška v akreditovanom laboratóriu nie je potrebná, ak predpokladaný zdroj iniciácie mal s istotou dostatok energie na iniciovanie konkrétnej látky (napr. otvorený plameň dokáže iniciovať takmer všetky horľavé látky).

Teplotu vznietenia a vzplanutia vybraných tuhých horľavých látok ilustruje tabuľka 10-1. Bod vzplanutia a teplotu vznietenia vybraných horľavých kvapalín ilustruje tabuľka 10-2 a minimálnu teplotu vznietenia usadenej vrstvy prachu a teplotu vznietenia rozvíreného prachu tabuľka 10-3.

Tabuľka 10-1 Teplota vzplanutia a vznietenia vybraných tuhých horľavých látok

Materiál	Teplota vzplanutia (°C)	Teplota vznietenia (°C)
Bavlna	254	254
Polyetylén	340-430	350-450
Polypropylén	350-370	370-410
PVC (bez aditív)	441	474

Prameň: Babrauskas (2003)

Tabuľka 10-2 Bod vzplanutia a teplota vznietenia vybraných horľavých kvapalín

Kvapalina	Bod vzplanutia (°C)	Teplota vznietenia (°C)
Acetón	-18	465
Anilín	70	530
Akroleín	-26	278
Benzén	-11	580
Cyklohexán	-20	310
Heptán	-4	223
Hexán	-23	223
Sírouhlík	-30	100
Styrén	31	490

Prameň: Babrauskas (2003)

Tabuľka 10-3 Minimálna teplota vznietenia usadenej vrstvy prachu a teplota vznietenia rozvíreného prachu vybraných materiálov

Materiál	Minimálna teplota vznietenia usadenej vrstvy prachu (°C)	Teplota vznietenia rozvíreného prachu (°C)
Káva	270	720
Kakao	200-390	420-510
Korok	210-280	460-490
Kukuričný škrob	330-380	380-430
Múka	230-320	450-490
Polystyrén	470	490-560
Ryža	220-480	440-520
Škorica	230	440

Prameň: Babrauskas (2003)

Exaktnejšou iniciačnou charakteristikou ako teploty (vzplanutia, vznietenia a pod.) je **kritická hustota tepelného toku**.

Kritická hustota tepelného toku prenášaného tepelným žiarením (radiáciou) je minimálna hustota tepelného toku v $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, ktorá spôsobí zapálenie materiálu. Kritická hustota tepelného toku sa delí na *kritickú hustotu tepelného toku vzplanutia* (na produkty termického rozkladu pôsobí pomocný iniciačný zdroj, napr. iskrový iniciátor) a *kritickú hustotu tepelného toku vznietenia* (na produkty termického rozkladu nepôsobí pomocný iniciačný zdroj, k iniciácii dochádza teda výlučne pôsobením tepelného žiarenia). Z historického hľadiska bola väčšina vedeckých prác zameraná na stanovenie kritickej hustoty

tepelného toku vzplanutia, ale v súčasnosti je už k dispozícii relatívne dostatočný počet údajov aj o kritickej hustote tepelného toku vznietenia.

Pred popisom metodiky stanovenia kritickej hustoty tepelného toku je potrebné popísať tepelnú hrúbku materiálov.

Za tepelne tenký materiál sa v požiarnom inžinierstve považuje materiál, ktorý sa následkom tepelného zaťaženia pred iniciáciou celý prehreje na kritickú teplotu (teplota povrchu v okamihu iniciácie je približne rovnaná, ako teplota celého materiálu). *Za tepelne hrubý materiál* sa považuje materiál, ktorý sa následkom tepelného zaťaženia najskôr iniciuje, bez toho aby sa celý prehrial na kritickú teplotu (teplota neexponovaného povrchu je v okamihu iniciácie podstatne nižšia, ako teplota exponovaného povrchu). Problematickou záležitosťou ostávajú kritériá pre jednoznačnú klasifikáciu tepelnej hrubého a tepelne tenkého materiálu. Buštorová a kol. (2011) navrhli ako kritérium pre rozlíšenie tepelne hrubých a tepelne tenkých materiálov rozdiel teplôt medzi exponovanou a neexponovanou stranu vzorky. Pričom za tepelne tenké materiály považujú také, ktorých teplota na neexponovanej strane vzorky dosiahne v okamihu iniciácie minimálne 50 % teploty na exponovanej strane vzorky. Naopak za tepelne hrubé považuje citovaný autorský kolektív také materiály na neexponovanej strane ktorých v okamihu iniciácie nedosahuje teplota 50 % z teploty na exponovanej strane vzorky. Uvedené kritérium je exaktné, ale v praxi je komplikované získať hodnoty potrebné na vyhodnotenie tepelnej hrúbky na jeho základe. Jednoduchšie je možné tepelnú hrúbku materiálu vyhodnotiť na základe vedeckej práce Mikkolu (2009), podľa ktorej sa materiály za podmienok reálneho požiaru správajú ako tepelne hrubé už od hrúbky niekoľko mm. Uvedené kritérium je ťažko aplikovateľné pri materiáloch s hrúbkou niekoľko mm, kedy na jeho základe nemusí byť možné vyvodiť jednoznačný záver o tepelnej hrúbke materiálu. Rýchle a pomerne jednoznačné posúdenie tepelnej hrúbky materiálu umožňuje rovnica [10.1], ktorú odvodili a popísali Babrauskas a Parker (1987).

$$L = 0,6 \cdot \frac{\rho}{\dot{q}''} \quad (\text{mm}) \quad [10.1]$$

L : hrúbka vzorky materiálu od ktorej sa tento považuje za tepelne hrubý (mm)

ρ : hustota vzorky ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

\dot{q}'' : hustota tepelného toku dopadajúca na povrch vzorky ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$)

Aj keď tepelná hrúbka materiálu závisí od viacerých jeho vlastností (nie len hrúbky, hustoty a hustoty tepelného toku, ale aj od koeficienta tepelnej vodivosti, špecifickej tepelnej kapacity a ďalších vlastností), pre podmienky požiaru môže byť rovnica [10.1] považovaná za spoľahlivú pri určení tepelnej hrúbky materiálu.

Metodika stanovenia kritickej hustoty tepelného toku je rovnaká pre kritickú hustotu tepelného toku vzplanutia aj vznietenia (rozdiel je len v použitý alebo nepoužitý pomocného iskrového iniciátora). Pri tepelne hrubých aj tepelne tenkých materiáloch je potrebné zmerať čas iniciácie pri minimálne troch hustotách tepelných tokov. Následne sa pre tepelne tenké materiály zostrojí štatistická závislosť prevráteného času iniciácie od hustoty tepelného toku a pre tepelne hrubé materiály štatistická závislosť času iniciácie umocneného na $-1/2$ od hustoty tepelného toku. Následne sa do zostrojenej štatistickej závislosti dosadí nulová hodnota za prevrátenú hodnotu času iniciácie (tepelne tenké materiály) alebo za hodnotu času iniciácie umocnenú na $-1/2$ (tepelne hrubé materiály).

Uvedené hodnoty matematicky zodpovedajú nekonečnému času iniciácie. Z takto upravenej rovnice sa následne vypočíta kritická hustota tepelného toku (hustota tepelného toku, ktorá by teoreticky zodpovedala nekonečnému času iniciácie). Takto vypočítaná kritická hustota tepelného toku je o približne 3 kW.m⁻² nižšia, ako skutočná (Mikkola 2009).

Závislosť času iniciácie umocneného na -1/2 od hustoty tepelného toku smrekového dreva s hrúbkou 20 mm (tepelne hrubý materiál) ilustruje obr. 10-1. Na obr. 10-1 je rovnako znázornená rovnica štatistickej závislosti času iniciácie umocneného na -1/2 od hustoty tepelného toku, koeficient determinácie (R^2) a vypočítaná kritická hustota tepelného toku (7,07 kW.m⁻²). Sto násobok koeficienta determinácie vyjadruje na koľko % závisí zmena času iniciácie umocneného na -1/2 od hustoty tepelného toku. Hodnotu koeficienta determinácie je možné využiť pre verifikáciu, či nedošlo počas merania k získaniu chybných hodnôt a či bola posúdená správne tepelná hrúbka materiálu. Po zohľadnení výsledkov vedeckej práce Mikkolu (2009) (zvýšenie stanovenej kritickej hustoty tepelného toku o 3 kW.m⁻²) je za kritickú hustotu tepelného toku smrekového dreva možné považovať 10 kW.m⁻².

Kritickú hustotu tepelného toku (pri aplikácii pomocného iniciačného zdroja) vybraných materiálov ilustruje tabuľka 10-4. Hodnoty v tabuľke 10-4 majú ilustračný charakter, nakoľko kritická hustota tepelného toku materiálov (s rovnakým chemickým zložením) závisí od ich hustoty, vlhkosti, štruktúry, obsahu aditív, drsnosti povrchu a ďalších vlastností.

Znalosť kritickej hustoty tepelného toku umožňuje okrem iného výpočet teploty materiálu na povrchu v okamihu iniciácie. Na tomto mieste je potrebné upozorniť, že teplota vzplanutia ani vznietenia sa nerovná teplote na povrchu materiálu v okamihu iniciácie. Teplotu materiálu na povrchu v okamihu iniciácie je možné vypočítať podľa rovníc [10.2 a 10.3]. Rovnice [10.2 a 10.3] odvodili a popísali Mikkola a Wichman (1989). Rovnica [10.2] platí pre tepelne tenké a rovnica [10.3] pre tepelne hrubé materiály.

$$t_{ig} = \rho \cdot c_p \cdot L \frac{T_{ig} - T_0}{q''} \quad (s) \quad [10.2]$$

t_{ig} : čas iniciácie (s)

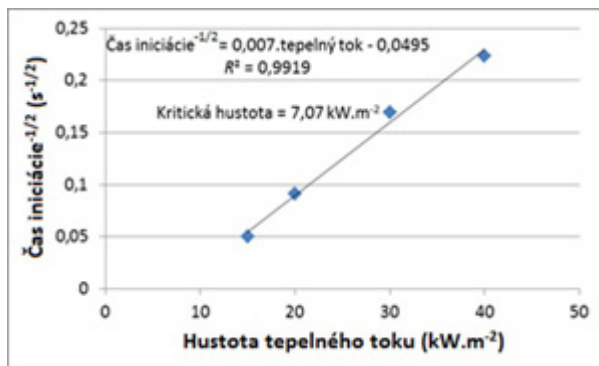
c_p : špecifická tepelná kapacita (kJ.kg⁻¹.K⁻¹)

T_{ig} : teplota na povrchu materiálu v okamihu iniciácie (°C)

T_0 : teplota okolia (°C)

$$t_{ig} = \frac{\pi}{4} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c_p \cdot \left(\frac{T_{ig} - T_0}{q''} \right)^2 \quad (s) \quad [10.3]$$

λ : koeficient tepelnej vodivosti materiálu (kW.m⁻¹.K⁻¹)



Obrázok 10-1 Štatistická závislosť času iniciácie umocneného na $-1/2$ od hustoty tepelného toku smrekového dreva s hrúbkou 20 mm (tepelne hrubý materiál)

Podobným spôsobom je možné určiť kritickú hustotu tepelného toku horľavých kvapalín.

Tabuľka 10-4 Kritická hustota tepelného toku vybraných materiálov

Materiál	Kritická hustota tepelného toku (kW.m ⁻²)
Múka	10
Cukor	10
Novinový papier	10
Dub červený	10
Polystyrén	13
Expandovaný polystyrén	10 až 15
Polypropylén	15
Nylón	15
Polymetylmetakrylát	11
Polyetylén (s vysokou hustotou)	15
Polykarbonát	15
Teflonová tkanina	50

Prameň: Scudamore a kol. (1991)

10.2.

Medze výbušnosti horľavých plynov, pár a prachov

Dolná medza horľavosti (výbušnosti) horľavého plynu, pary horľavej kvapaliny a prachu je definovaná ako minimálna koncentrácia horľavej látky vo vzduchu, ktorá môže byť zapálená a horieť (alebo explodovať) za podmienok skúšky. **Horná medza výbušnosti** horľavého plynu, pary horľavej kvapaliny a prachu je definovaná ako maximálna koncentrácia horľavej látky vo vzduchu, ktorá môže byť zapálená a horieť (alebo explodovať) za podmienok skúšky.

Pre horľavé kvapaliny existujú okrem koncentračných medzí horľavosti teplotné medze horľavosti. **Dolná teplotná medza horľavosti** horľavej kvapaliny môže byť definovaná, ako teplota na ktorú je potrebné ohriať horľavú kvapalinu aby jej pary, za podmienok skúšky, dosiahli v zmesi so vzduchom dolnú koncentračnú medzu horľavosti. Naopak **horná teplotná medza horľavosti** môže byť definovaná ako teplota na ktorú je potrebné zahriať horľavú kvapalinu aby jej pary, za podmienok skúšky, dosiahli v zmesi so vzduchom hornú koncentračnú medzu horľavosti. Na tomto mieste je však potrebné upozorniť, že narastajúca teplota horľavej kvapaliny spôsobí dosiahnutie hornej koncentračnej medze horľavosti (výbušnosti) jej pár len v uzatvorenej sústave (napr. v uzatvorenej cisterne). V otvorenej (voľne priestranstvo) alebo polouzatvorenej sústave bude narastajúca teplota spôsobovať rozšírenie pár horľavých kvapalín s (koncentráciou nad dolnou koncentračnou medzou horľavosti) do väčších vzdialeností od povrchu kvapaliny.

Dolné medze horľavosti (výbušnosti) vybraných horľavých látok ilustruje tabuľka 10-5.

Medze horľavosti (výbušnosti) majú v oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov aplikáciu predovšetkým pri posudzovaní miery zodpovednosti (aplikujú sa teda predovšetkým pri zisťovaní príčin požiarov pre potreby vyšetrovania). Dôvodom je skutočnosť, že explóziu horľavých plynov, pár horľavých kvapalín alebo rozvírených prachov je možné zistiť na základe stôp po výbuchu (stopy si vo väčšine prípadov spôsobené tlakovým účinkom). Vytvorenie výbušnej atmosféry (horľavých plynov, pár horľavých kvapalín a rozvírených prachov) je vo väčšine prípadov spojené s nesplnením povinnosti ustanovených všeobecne záväznými právnymi predpismi. Inou kategóriou explózií sú výbuchy priemyselných výbušnín. Táto kategória primárne nepatrí do zisťovania príčin vzniku požiarov, ale následkom explózie priemyselnej výbušniny môže vzniknúť požiar a naopak požiar môže spôsobiť výbuch priemyselnej výbušniny. Rozlíšenie, či explóziu spôsobila priemyselná výbušnina alebo plyn, para horľavej kvapaliny, prípadne rozvírený prach je možné na základe odobratých vzoriek z okolia miesta explózie (najčastejšie sa vzorky výbuchových splodín odoberajú vo forme sterov).

Tabuľka 10-5 Dolné medze horľavosti (výbušnosti) vybraných látok

Látka	Dolná medza horľavosti (g.m ⁻³)
Acetón	61,7
Akroleín	64,2
Benzén	41,5
Drevná kôra	20
Drevné uhlie	140
Drevný prach	35–50
Etanol	62,2
Škorica	60
Kakao	45–75
Káva	85–150
Kukurikový škrob	45–55
Metanol	87,8
Múka	55–65
Práškový cukor	45
Ryža	50–180
Uhoľný prach	130

Prameň: Babrauskas (2003)

10.3.

Trieda reakcie na oheň stavebných výrobkov

Trieda reakcie stavebných výrobkov predstavuje v súčasnosti v Európskej únii najčastejšie stanovovanú požiarnotechnickú charakteristiku.

V STN EN 13501-1+A1:2010 je reakcia na oheň definovaná ako príspevok výrobku k rozvoju požiaru, ktorému je exponovaný. Citovaná technická norma uvádza tri skupiny stavebných výrobkov.

Prvú skupinu tvoria stavebné výrobky okrem podlahových krytín a tepelnoizolačných výrobkov na lineárne potrubia. Tieto výrobky sa na základe výsledkov skúšok klasifikujú do siedmich tried reakcie na oheň: A1, A2, B, C, D, E a F. Príspevok k rozvoju požiaru narastá od triedy A1 po triedu F (výrobky klasifikované do triedy reakcie na oheň A1 neprispievajú k rozvoju požiaru ktorému sú exponované a výrobky klasifikované do triedy reakcie na oheň F vykazujú najvyšší príspevok k rozvoju požiaru ktorému sú exponované, resp. pre triedu reakcie na oheň F nie sú stanovené žiadne klasifikačné kritériá – do tejto triedy sa klasifikujú výrobky ktoré nespĺnia kritérium požadované pre triedu E). Stavebné výrobky klasifikované do tried reakcie na oheň A2 až D sa s ohľadom na tvorbu dymu klasifikujú doplnkovou klasifikáciou: s1, s2 a s3 (tvorba dymu narastá od doplnkovej klasifikácie s1 po s3). S ohľadom na tvorbu horiacich kvapiek alebo častíc sa stavebné výrobky klasifikované do triedy reakcie na oheň A2 až E klasifikujú doplnkovou klasifikáciou: d0, d1 a d2 (tvorba horiacich kvapiek alebo častíc narastá od klasifikácie d0 po d2).

Druhú skupinu tvoria podlahové krytiny. Podlahové krytiny sa na základe skúšok klasifikujú do siedmich tried reakcie na oheň: A_{fl}, A2_{fl}, B_{fl}, C_{fl}, D_{fl}, E_{fl} a F_{fl}. Index _{fl} je skratka anglického slova floor (podlaha). Príspevok k rozvoju požiaru narastá od triedy A_{fl} po triedu F_{fl}, resp. pre triedu F_{fl} nie sú stanovené žiadne kritériá (do triedy F_{fl} sa klasifikujú podlahové krytiny, ktoré nespĺnia kritérium požadované pre triedu E_{fl}). Podlahové krytiny klasifikované do tried reakcie na oheň A2_{fl} až D_{fl} sa s ohľadom na tvorbu dymu klasifikujú doplnkovou klasifikáciou: s1 a s2 (s2 vykazuje vyššiu tvorbu dymu ako s1).

Tretiu skupinu tvoria tepelnoizolačné výrobky na lineárne potrubia. Tepelnoizolačné výrobky na lineárne potrubia sa na základe skúšok klasifikujú do siedmich tried reakcie na oheň: A_L, A2_L, B_L, C_L, D_L, E_L a F_L. Index _L je skratka anglického slova linear (lineárny). Príspevok k rozvoju požiaru narastá od triedy A_L po triedu F_L, resp. pre triedu F_L nie sú stanovené žiadne kritériá (do triedy F_L sa klasifikujú tepelnoizolačné výrobky na lineárne potrubia, ktoré nespĺnia kritérium požadované pre triedu E_L). Tepelnoizolačné výrobky na lineárne potrubia klasifikované do tried reakcie na oheň A2_L až D_L sa s ohľadom na tvorbu dymu klasifikujú doplnkovou klasifikáciou: s1, s2 a s3 (tvorba dymu narastá od doplnkovej klasifikácie s1 po s3). S ohľadom na tvorbu horiacich kvapiek alebo častíc sa tepelnoizolačné výrobky na lineárne potrubia klasifikované do triedy reakcie na oheň A2_L až E_L klasifikujú doplnkovou klasifikáciou: d0, d1 a d2 (tvorba horiacich kvapiek alebo častíc narastá od klasifikácie d0 po d2).

Okrem uvedených troch skupín sa na základe reakcie na oheň klasifikujú aj elektrické káble. Podľa STN EN 13501-6:2015 sa na základe výsledkov skúšok klasifikujú elektrické káble do siedmich tried reakcie na oheň: A_{ca}, B1_{ca}, B2_{ca}, C_{ca}, D_{ca}, E_{ca} a F_{ca}. Index _{ca} je skratkou anglického slova cable (kábel). Elektrické káble klasifikované do tried reakcie na oheň B1_{ca}, B2_{ca}, C_{ca} a D_{ca} sa klasifikujú doplnkovou klasifikáciou s ohľadom na tvorbu dymu: s1, s1a, s1b, s2 a s3 (tvorba dymu narastá od doplnkovej klasifikácie

s1 po s3, pričom s1a a s1b je doplnková klasifikácia s1), s ohľadom na tvorbu horiacich kvapiek alebo častíc: d0, d1 a d3 (tvorba horiacich kvapiek alebo častíc narastá od klasifikácie d0 po d2) a s ohľadom na kyslosť spodín horenia: a1, a2 a a3 (kyslosť spodín horenia narastá od a1 po a3).

Praktický význam a využitie triedy reakcie na oheň stavebných výrobkov vyplýva zo skutočnosti, že z reakcie na oheň je možné urobiť predikciu ich správania sa za referenčných požiarnych scenárov. Technická norma STN EN 13501-1+A1:2010 uvádza tri referenčné požiarne scenáre pre stavebné výrobky a tepelnoizolačné výrobky na lineárne potrubia okrem podlahových krytín a tri referenčné požiarne scenáre pre podlahové krytiny.

Referenčné požiarne scenáre pre stavebné výrobky okrem podlahových krytín a pre tepelnoizolačné výrobky na lineárne potrubia (STN EN 13501-1+A1:2010):

- *pôsobenie malého plameňa na obmedzenú plochu* (reprezentuje počiatkové pôsobenie plameňa),
- *osamelo horiaci predmet v miestnosti* (reprezentuje situáciu pred etapou falshover),
- *plne rozvinutý požiar v miestnosti* (reprezentuje fázu po celkovom vzplanutí – falshover).

Referenčné požiarne scenáre pre podlahové krytiny (STN EN 13501-1+A1:2010):

- *pôsobenie malého plameňa na obmedzenú plochu* (reprezentuje počiatkové pôsobenie plameňa),
- *plne rozvinutý požiar v susednej miestnosti* (reprezentuje plne rozvinutý požiar v susednej miestnosti),
- *plne rozvinutý požiar v miestnosti* (reprezentuje fázu po celkovom vzplanutí – falshover).

Vzťah medzi triedami reakcie na oheň stavebných výrobkov okrem podlahových krytín a tepelnoizolačných výrobkov na lineárne potrubia a referenčnými požiarnymi scenármi (STN EN 13501-1+A1:2010):

- Trieda E, E_L: výrobky schopné odolávať pôsobeniu malého plameňa počas krátko časového intervalu bez významného rozšírenia plameňa.
- Trieda D, D_L: výrobky schopné odolať pôsobeniu malého plameňa po dlhší časový interval (ako trieda E a E_L) bez významného rozšírenia plameňa. Okrem toho sú schopné odolať pôsobeniu tepla od osamelo horiaceho predmetu za podstatného oneskorenia a obmedzenia uvoľňovania tepla.
- Trieda C, C_L: rovnako ako trieda D D_L, ale vyhovuje prísnejším požiadavkám. Navyše pri tepelnom pôsobení osamelo horiaceho predmetu vykazujú obmedzené rozšírenie plameňa.
- Trieda B, B_L: rovnako ako trieda C a C_L, ale vyhovuje prísnejším požiadavkám.
- Trieda A2, A2_L: spĺňa rovnaké požiadavky, ako trieda B a B_L. Okrem toho za podmienok plne rozvinutého požiaru nebude významne prispievať k zvýšeniu požiarneho zaťaženia ani ďalšiemu rozvoju požiaru.
- Trieda A1, A1_L: nebude prispievať k rozvoju požiaru v žiadnej etape jeho rozvoja, vrátane plne rozvinutého požiaru.

Vzťah medzi triedami reakcie na oheň podlahových krytín a referenčnými požiarnymi scenármi (STN EN 13501-1+A1:2010):

- Trieda E_{fl}: výrobky schopné odolávať malému plameňu.
- Trieda D_{fl}: výrobky schopné odolávať malému plameňu a okrem toho schopné v určitom časovom intervale odolávať pôsobeniu tepelného toku (tepelného žiarenia).

- Trieda C_{fl} : ako trieda D_{fl} , ale vyhovujúca prísnejším požiadavkám (schopnosť odolávať vyššej hustote tepelného toku ako trieda D_{fl}).
- Trieda B_{fl} : ako trieda C_{fl} , ale vyhovujúca prísnejším požiadavkám (schopnosť odolávať vyššej hustote tepelného toku ako trieda C_{fl}).
- Trieda $A2_{fl}$: z hľadiska odolnosti voči tepelnému toku vyhovuje rovnakým požiadavkám, ako trieda B_{fl} . Okrem toho tieto výrobky za podmienok plne rozvinutého požiaru významne neprispievajú k zvyšovaniu požiarneho zaťaženia ani ďalšiemu rozvoju požiaru.
- Trieda $A1_{fl}$: Neprispieva k rozvoju požiaru v žiadnej jeho etape, vrátane etapy plne rozvinutého požiaru.

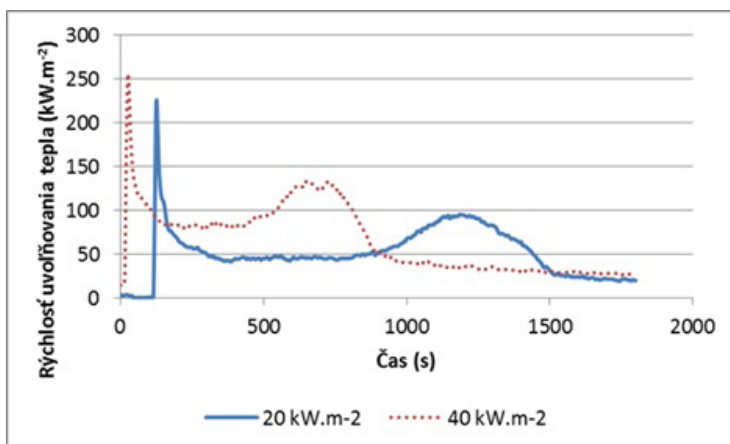
10.4.

Rýchlosť uvoľňovania sprievodných javov požiaru

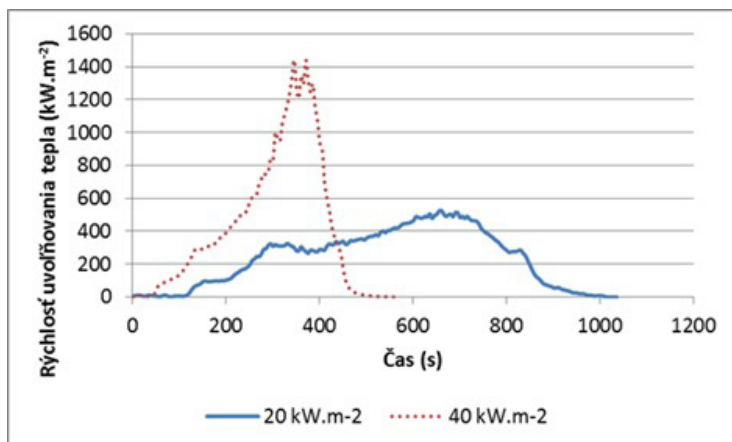
Medzi najdôležitejšie požiarnotechnické charakteristiky umožňujúce posúdenie vplyvu požiaru látky na okolie (životy osôb, majetok a pod.) sú vlastnosti vyjadrujúce rýchlosť uvoľňovania sprievodných javov požiaru. Základnými sprievodnými javmi požiaru sú teplo a splodiny horenia. Z hľadiska požiarnotechnických charakteristík ide o rýchlosť uvoľňovania tepla, oxidu uhoľnatého a dymu.

Rýchlosť uvoľňovania tepla je množstvo tepla uvoľnené z jednotkovej plochy horľavej látky za jednotku času. Jednotkou rýchlosti uvoľňovania tepla je $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Táto jednotka môže byť prepísaná do tvaru $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, ktorý popisuje prečo sa táto veličina nazýva **rýchlosť** uvoľňovania tepla.

Rýchlosť uvoľňovania tepla zo smrekového dreva a polyetylénu ilustrujú obr. 10-2 a 10-3.



Obrázok 10-2 Rýchlosť uvoľňovania tepla zo smreka obyčajného zaťaženého tepelným tokom s hustotou 20 a 40 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ (Martinka a kol. 2014d)

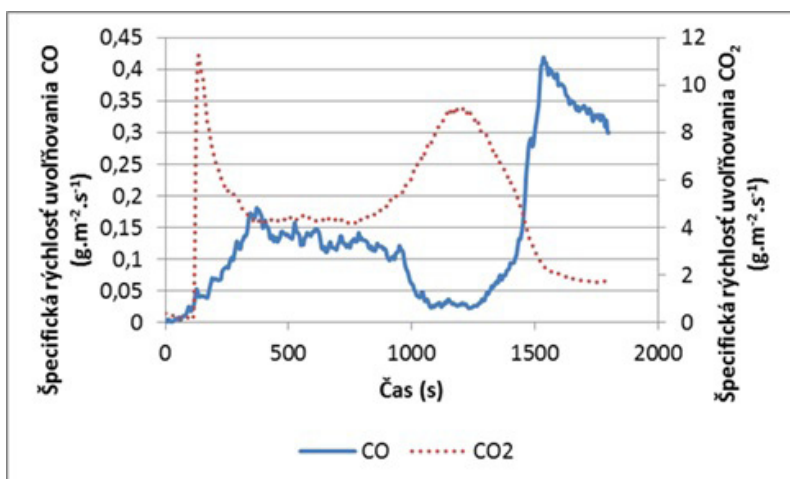


Obrázok 10-3 Rýchlosť uvoľňovania tepla z polyetylénu s vysokou hustotou zataženého tepelným tokom s hustotou 20 a 40 kW.m^{-2} (Martinka a kol. 2014e)

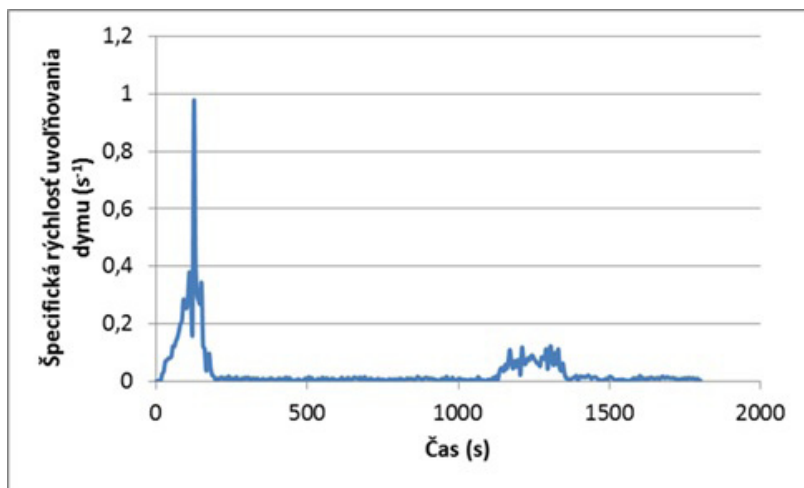
Jednotkou (špecifickej) rýchlosti uvoľňovania oxidu uhoľnatého je $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ a (špecifickej) rýchlosti tvorby dymu je $\text{m}^2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Táto jednotka zjednodušene vyjadruje, akú plochu svetelného lúča zakryjú častičky dymu uvoľnené zo vzorky s plochou 1 m^2 za časový interval 1 s. Okrem rýchlosti uvoľňovania tepla, oxidu uhoľnatého a dymu je pre potreby zistenia podmienok v požiarom úseku často potrebné poznať aj rýchlosť uvoľňovania oxidu uhličitého a spotreby kyslíka.

Celková rýchlosť uvoľňovania tepla, oxidu uhoľnatého, oxidu uhličitého, dymu a spotreby kyslíka sa počíta ako súčin plochy horiaceho materiálu a špecifickej rýchlosti uvoľňovania alebo spotreby konkrétnej premennej.

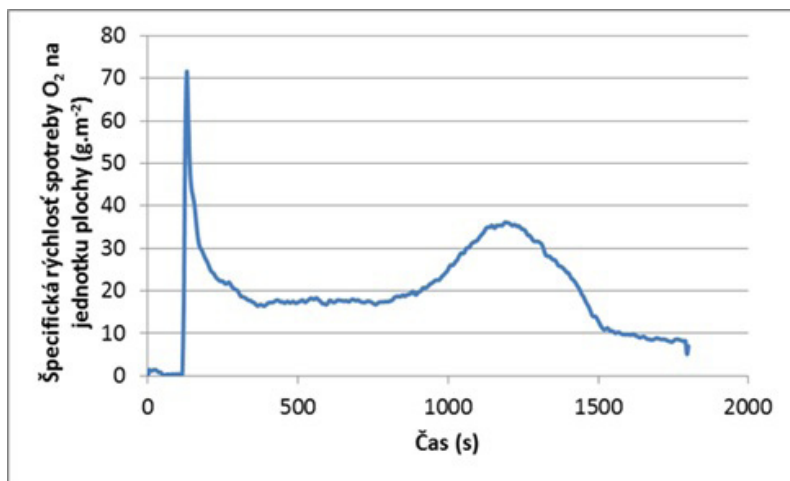
Špecifickú rýchlosť uvoľňovania oxidu uhoľnatého, oxidu uhličitého, dymu a spotreby kyslíka pri horení smrekového dreva ilustrujú obr. 10-4 až 10-6.



Obrázok 10-4 Špecifická rýchlosť uvoľňovania CO a CO_2 zo smrekového dreva zataženého tepelným žiarením s hustotou tepelného toku 20 kW.m^{-2} (Martinka a kol. 2014e)

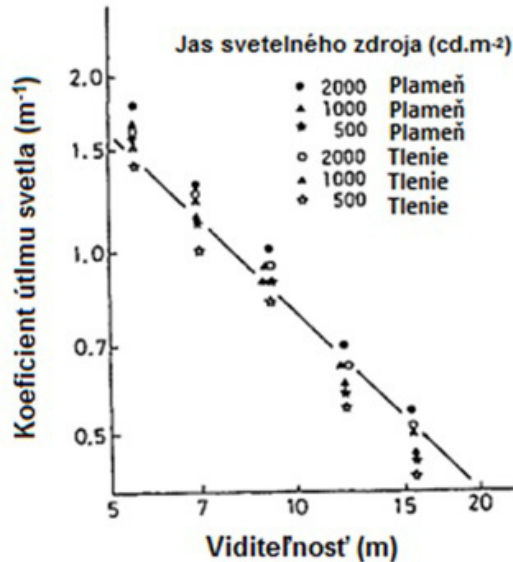


Obrázok 10-5 Špecifická rýchlosť uvoľňovania dymu zo smrekového dreva zataženého tepelným žiarením s hustotou tepelného toku $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$



Obrázok 10-6 Špecifická rýchlosť spotreby O_2 pri horení smrekového dreva zataženého tepelným žiarením s hustotou tepelného toku $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$

Výsledkom podielu celkovej rýchlosti uvoľňovania dymu a jeho objemu je koeficient útlmu svetla (s jednotkou m^{-1}). Závislosť viditeľnosti v priestore od koeficienta útlmu svetla ilustruje obr. 10-7.



Obrázok 10-7 Vzájomný vzťah viditeľnosti a koeficienta útlmu svetla v prostredí (Ostman 2009)

Pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov (odhadu podmienok v požiarom úseku počas požiaru) sa okrem špecifickej rýchlosti uvoľňovania sprievodných javov pri požari používa ich výťažok na jednotku hmotnosti. Tento prístup umožňuje vypočítať množstvo uvoľneného tepla, oxidu uhoľnatého, oxidu uhličitého, dymu a spotrebovaného kyslíka z úbytku hmotnosti materiálov v požiarom úseku.

10.5. Sklon tuhej látky k propagácii požiaru vo fáze flashover

Jednou z najvýznamnejších charakteristík vyjadrujúcich správanie sa materiálu za podmienok reálneho požiaru je jeho príspevok k dosiahnutiu etapy rozvoja požiaru flashover.

Jedinou normalizovanou skúškou, ktorá hodnotí správanie sa materiálu vo fáze flashover je skúška podľa ISO 9705:1993. Na základe výsledkov tejto skúšky sa materiály klasifikujú do jednej zo štyroch kategórií: FO-1 (flashover počas skúšky nenastane), FO-2 (flashover nastane v časovom intervale od 600 do 1200 s), FO-3 (flashover nastane v časovom intervale od 120 do 600 s) a FO-4 (flashover nastane v časovom intervale do 120 s od začiatku skúšky).

Vzájomný vzťah medzi triedou reakcie materiálu na oheň a výsledkom skúšky podľa ISO 9705:1993 ilustruje obr. 10-8. Etapu flashover reprezentuje čiara označená I. Z obr. 10-8 vyplýva, že pri skúške podľa ISO 9705:1993 by stavebný výrobok s triedou reakcie na oheň E dosiahol etapu flashover do 120 s (FO-4), s triedou reakcie na oheň D od 120

do 600 s (FO-3), s triedou reakcie na oheň C od 600 do 1200 s (FO-2). Stavebné výrobky s triedou reakcie na oheň B, A2 a A1 by počas skúšky podľa ISO 9705:1993 etapu flashover nedosiahli.

Skúška podľa ISO 9705:1993 je navrhnutá tak, aby umožnila posúdenie správania sa vnútorných obkladových materiálov za najnepriaznivejších podmienok. Napriek tomu je však potrebné upozorniť, že sa stále jedná len o referenčnú požiaru skúšku, teda podmienky jej vykonania sa budú viac alebo menej líšiť od podmienok reálneho požiaru. Navyše vzájomný vzťah medzi triedami reakcie na oheň stavebných výrobkov a výsledkami skúšok podľa ISO 9705:1993 bol získaný na základe nástrojov matematickej štatistiky (ide teda o štatistickú platnosť). Na základe uvedených skutočností je korektnejší záver, že stavebné materiály triedy reakcie na oheň B vykazujú veľmi nízku pravdepodobnosť dosiahnutia etapy flashover za podmienok reálneho požiaru. V prípade materiálov triedy reakcie na oheň A1 a A2 môže byť dosiahnutie etapy flashover vylúčené už z kritérií, ktoré tieto materiály pre klasifikáciu do uvedených tried reakcie na oheň musia splniť.

Predikcia správania sa materiálu za podmienok skúšky podľa ISO 9705:1993 však môže byť urobená nie len na základe triedy reakcie na oheň, ale aj na základe výsledkov skúšok na kónickom kalorimetri, skúšobným postupom podľa ISO 5660-1:2002 pri zaťažení vzorky tepelný tokom s hustotou 50 kW.m⁻². Na uvedenú predikciu sa vo svete používa viac metód. Jednou z najspoľahlivejších a v súčasnosti najpoužívanejšou je metóda podľa Kokkalu a kol. (1993). Táto metóda bola implementovaná do viacerých zahraničných technických noriem a predpisov. Príkladom implementácie je verifikačná metóda C/VM2:2013, kde je pre použitie materiálu v únikových cestách predpísaná jeho flashover kategória stanovená v zmysle citovanej metódy.

Podstatou Kokkalovej a kol. (1993) metódy je výpočet indexu iniciácie podľa rovnice [10.4] a indexu rýchlosti uvoľňovania tepla podľa rovnice [10.5].

$$I_{IG} = \frac{1}{t_i} \text{ (min}^{-1}\text{)} \quad [10.4]$$

I_{IG} : index iniciácie (min⁻¹)

t_i : čas iniciácie – čas v ktorom rýchlosť uvoľňovania tepla zo vzorky prvý krát dosiahne hodnotu 50 kW.m⁻² (min)

$$I_Q = \int_{t_i}^{t_{\text{end}}} \left[\frac{\text{HRR}(t)}{(t-t_i)^m} \right] dt \text{ (-)} \quad [10.5]$$

I_Q : index rýchlosti uvoľňovania tepla (-)

HRR(t): okamžitá rýchlosť uvoľňovania tepla v čase t (kW.m⁻²)

t : čas (s)

m : empirická konštanta (pri výpočte sa dosadzujú dve hodnoty 0,34 a 0,93) (-)

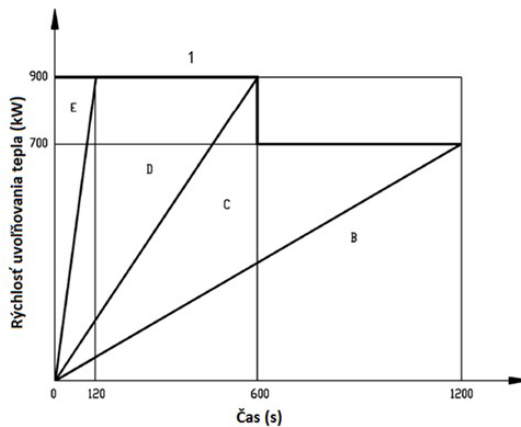
Čas do dosiahnutia etapy flashover sa počíta z nerovnic [10.6 až 10.9]. V prípade platnosti nerovnice [10.6] je materiál klasifikovaný do kategórie FO-4, ak platí nerovnica [10.7] do kategórie FO-3, pri platnosti nerovnice [10.8] do kategórie FO-2 a v prípade platnosti nerovnice [10.9] do kategórie FO-1. Ak počas celého času trvania skúšky nedosiahne rýchlosť uvoľňovania tepla hodnotu 50 kW.m⁻², klasifikuje sa materiál do kategórie FO-1 (C/VM2:2013).

$$I_{Q(m=0,34)} > 6800 - 540 \cdot I_{IG} \wedge I_{Q(m=0,93)} > 2475 - 165 \cdot I_{IG} \quad [10.6]$$

$$I_{Q(m=0,34)} > 6800 - 540 \cdot I_{IG} \wedge I_{Q(m=0,93)} \leq 2475 - 165 \cdot I_{IG} \quad [10.7]$$

$$I_{Q(m=0,34)} \leq 6800 - 540 \cdot I_{IG} \wedge I_{Q(m=0,93)} > 1650 - 165 \cdot I_{IG} \quad [10.8]$$

$$I_{Q(m=0,34)} \leq 6800 - 540 \cdot I_{IG} \wedge I_{Q(m=0,93)} \leq 1650 - 165 \cdot I_{IG} \quad [10.9]$$



Obrázok 10-8 Vzájomný vzťah medzi triedami reakcie na oheň a výsledkami skúšok podľa ISO 9705:1993 (STN EN 13501-1+A1:2010)

Pomerne spoľahlivú metódu na predikciu času do dosiahnutia etapy flashover syntetických polymérov popísali vo svojej vedeckej práci Xu a kol. (2012). Táto metóda je založená na stanovení Pearsonovho koeficienta korelácie medzi rýchlosťou uvoľňovania tepla a koncentráciou oxidu uhoľnatého v splodinách horenia. Táto metóda je však vhodná len pre predikciu doby do dosiahnutia etapy flashover syntetických polymérov, nakoľko pri prírodných polyméroch (najmä dreve a materiáloch na báze dreva) vykazuje nízku spoľahlivosť. Materiál s absolútnou hodnotou Pearsonovho koeficienta korelácie medzi rýchlosťou uvoľňovania tepla a koncentráciou oxidu uhoľnatého v splodinách horenia v intervale od 0 do 0,3 klasifikuje citovaný autorský kolektív do kategórie FO-1 a materiál s absolútnou hodnotou Pearsonovho koeficienta korelácie v intervale od 0,7 do 1 do kategórie FO-4.

10.6.

Požiarotechnické charakteristiky pre špeciálne použitie

Do tejto skupiny sa zaraďujú také charakteristiky, ktoré kvôli technickému riešeniu skúšobného zariadenia, charakteru vzorky alebo skúšobného postupu nereprezentujú podmienky reálneho požiaru do takej miery, aby mohli byť využité priamo pre posúdenie

správania sa materiálu v určitej fáze rozvoja požiaru. Tieto charakteristiky sú však využiteľné pre iné špecifické úlohy pri zisťovaní príčin vzniku požiarov.

Typickým príkladom takejto požiarnotechnickej charakteristiky je kyslíkové číslo. Táto metóda bola vyvinutá ako rýchla kontrolná metóda pre kontrolu kvality plastov vo fáze výroby (iný pomer aditív pridaný do plastu sa významným spôsobom prejaví na kyslíkovom čísle). Táto metóda sa však začala široko využívať aj v požiarnom skúšobníctve napr. na relatívne porovnanie účinnosti retardérov horenia.

Táto metóda môže byť využitá na rýchlu kontrolu, či konkrétny materiál alebo výrobok o ktorom jeho výrobca alebo zodpovedná osoba deklarovala, že je chránený retardérom horenia ním bol skutočne chránený. Na tomto mieste je však potrebné zdôrazniť, že táto metóda môže byť využitá len na rýchlu kontrolu. Konečný výsledok je možné získať až na základe chemickej analýzy v akreditovanom laboratóriu metódami analytickej chémie. Typickým príkladom, kde táto metóda mohla nájsť uplatnenie bol požiar hradu Krásna Hôrka. V tomto prípade bolo možné porovnať kyslíkové číslo dreva z ktorého bol vyrobený šindel strechy so vzorkou šindľa zo strechy. Pokiaľ by boli hodnoty kyslíkových čísel takmer zhodné indikovala by táto skutočnosť, že šindel s vysokou pravdepodobnosťou nebol chránený retardérom horenia. Ak by šindel zo strechy vykázal štatisticky významne vyššiu hodnotu kyslíkového čísla bol šindel s vysokou pravdepodobnosťou chránený retardérom horenia. Pred takýmito skúškami je však potrebné zohľadniť aj ostatné faktory, ktoré môžu ovplyvniť výsledok skúšky (napr. vplyv vlhkosti môže byť odstránený vysušením vzorky na nulovú absolútnu vlhkosť a pod.).

11

Stanovenie príčiny vzniku požiaru

Stanovenie príčiny vzniku požiaru je výsledkom procesu zisťovania príčin vzniku požiarov. V predloženej publikácii budú ďalej uvedené všeobecné zásady postupu pri zisťovaní príčin vzniku požiarov v zmysle pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002 (v platnom znení) a postup stanovenia príčiny vzniku požiaru podľa NFPA 921:2014. Uvedené postupy však musia byť chápané v nadväznosti na kapitolou 8 (stopy po požiaroch).

11.1.

Zásady postupu pri zisťovaní príčin vzniku požiarov v zmysle pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002

Základný postup zisťovania príčin vzniku požiarov v podmienkach Hasičského a záchranného zboru MV SR je uvedený v prílohe č. 3 k pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002. Citovaný pokyn platí pre príslušníkov HaZZ u ktorých sa predpokladá, že majú vedomosti o zisťovaní príčin vzniku požiarov (získané odbornou prípravou a praktickými skúsenosťami).

Zásady postupu pri zisťovaní príčin vzniku požiaru a pri odbere vzoriek a dôkazového materiálu na požiarisku (príloha č. 3 k pokynu prezidenta HaZZ č. 60/2002 v platnom znení):

I. Zisťovateľ pri zisťovaní príčiny vzniku požiaru po príchode na požiarisko najmä

- a) vykoná statickú obhliadku požiariska so zameraním na zistenie miesta vzniku požiaru,
- b) zdokumentuje požiarisko so zameraním na jeho rozsah a tvar,
- c) podrobne sa oboznámi s konštrukčným riešením objektu, technológiou zariadení a výroby, druhmi a vlastnosťami prítomných horľavých materiálov, činnosťou zariadení a osôb pred požiarom a v čase vzniku požiaru,
- d) určí ohnisko požiaru podľa stupňa vyhorenia, deštrukčných príznakov, získaných poznatkov a výpovedí svedkov,
- e) vykoná v mieste ohniska požiaru dynamickú obhliadku so zameraním na zistenie možných iniciátorov vzniku požiaru, pričom dokumentuje zistené dôkazové fakty,
- f) určí verzie možných príčin vzniku požiaru,
- g) vykoná obhliadku požiariska zameranú na určenie podmienok možného šírenia sa požiaru po prítomných horľavých materiáloch a konštrukciách,
- h) zabezpečuje ďalšie potrebné údaje od zasahujúcich hasičských jednotiek, policajných orgánov a vyšetrovateľov Policajného zboru a vlastníka alebo užívateľa objektu pre ďalší spoločný postup s orgánmi Policajného zboru pri vykonávaní dynamickej obhliadky požiariska,

- i) odoberie vzorky dôkazových materiálov pre posúdenie požiarotechnických, bezpečnostných a iných požadovaných charakteristík.
- II. Účelom odberu a následného skúmania vzoriek dôkazových materiálov je potvrdenie, prípadne vylúčenie verzii možných príčin vzniku požiaru. Vzorky dôkazového materiálu sa z požiariska odoberajú najmä vtedy, ak**
- a) sa má dôkazový materiál odobrať z väčšieho množstva materiálu,
 - b) dôkazový materiál pre svoje rozmery nie je možné odobrať a zaslať na odborné posúdenie, pričom možno z neho odobrať vzorku,
 - c) na zistenie a posúdenie vlastností a charakteristík postačí vzorka materiálu.
- III. Spolu so vzorkami je potrebné na laboratórne preskúmanie a posúdenie zaslať tiež sprievodnú dokumentáciu, ktorú tvorí**
- a) protokol o odbere vzoriek a iného dôkazového materiálu,
 - b) fotodokumentácia s orientačným plánom požiariska a s fotografickými zábermi miesta odberu vzorky; miesto odberu vzorky sa označuje šípkou,
 - c) technická dokumentácia (podmienky prevzatia, výrobná dokumentácia, návod na použitie a podobne),
 - d) popis situácie v čase vzniku požiaru a na požiarisku,
 - e) popis jednotlivých vzoriek a základné informácie o týchto vzorkách.
- IV. Protokol o odbere vzoriek a dôkazového materiálu z požiariska musí obsahovať**
- a) označenie príslušného riaditeľstva Hasičského a záchranného zboru,
 - b) evidenčné číslo požiaru,
 - c) adresu miesta vzniku požiaru,
 - d) popis objektu, v ktorom bola vzorka odobratá (s uvedením miesta odberu vzorky),
 - e) popis vzorky so zameraním na jej pôvodné funkčné určenie a zistený stav, alebo popis materiálu, z ktorého bola vzorka odobratá s uvedením množstva vzorky,
 - f) dátum a čas odberu vzorky,
 - g) podmienky pri odbere (poveternostné, spôsob odberu a podobne),
 - h) spôsob balenia vzorky,
 - i) požiadavky na laboratórne skúmanie,
 - j) hodnosť, meno, priezvisko, funkcia a podpis osoby, ktorá vzorku odoberala a ktorá bola pri odbere vzorky prítomná,
 - k) hodnosť, meno, priezvisko, funkcia a podpis osoby, ktorá žiada o laboratórne preskúmanie a posúdenie vzorky.

11.2.

Postup zisťovania príčin vzniku požiarov v zmysle NFPA 921:2014

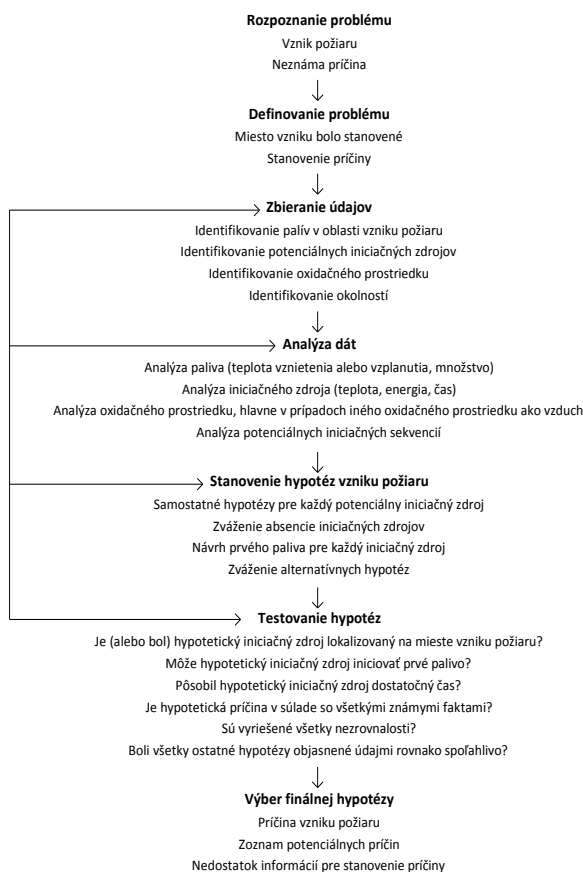
Zisťovanie príčin vzniku požiarov je proces identifikovania **prvého iniciovaného paliva, iniciačného zdroja, oxidačného prostriedku a okolností**, ktoré mali za následok vznik požiaru (NFPA 921:2014).

Stanovenie príčiny vzniku požiaru vyžaduje identifikáciu faktorov ktoré sú nevyhnutné pre vznik požiaru. Tieto faktory zahŕňajú prítomnosť iniciačného zdroja (s dostatočnou energiou), druh a formu prvého zapáleného paliva a okolnosti iniciácie (napr. nedbalé konanie osoby), ktoré umožnili spolupôsobenie uvedených faktorov a vznik požiaru (NFPA 921:2014).

Všeobecná metodika pre stanovenie príčiny vzniku požiaru je vedecká metóda, ktorá zahŕňa definovanie problému ktorý má byť riešený, zber dát, analýzu dát, stanovenie hypotézy alebo hypotéz a najdôležitejšou časťou je testovanie hypotézy alebo hypotéz. Za účelom použitia popísanej vedeckej metódy, zisťovateľ musí stanoviť minimálne jednu hypotézu na základe dostupných údajov. Tieto počiatočné hypotézy by mali byť považované za „pracovné hypotézy“, ktoré môžu byť na základe testovania zamietnuté, prehodnotené alebo podrobne rozšírené (s novými zozbieranými údajmi a aplikovanými novými analýzami počas zisťovania). Tento proces sa opakuje so získavaním nových informácií, tak ako je to znázornené na obr. 11-1 (NFPA 921:2014).

Proces zberu dát pre zistenie príčiny vzniku požiaru zahŕňa identifikáciu palív (zostáv paliva), iniciačných zdrojov, oxidačných prostriedkov a okolností. Dáta by mali byť zozbierané s ohľadom na identifikáciu všetkých potenciálnych palív, iniciačných zdrojov a oxidačných prostriedkov v oblasti vzniku požiaru. Dáta môže byť rovnako potrebné zbierať z plochy mimo oblasti vzniku požiaru. Príkladom môžu byť vzorky nezhořeného paliva alebo exempláre iniciačných zdrojov lokalizovaných mimo oblasti vzniku požiaru. Dáta o okolnostiach za ktorých došlo k interakcii paliva, iniciačného zdroja a oxidačného prostriedku môžu byť získané z množstva rôznych zdrojov. Cenné údaje môže priniesť analýza dokumentácie o ochrane pred požiarom (NFPA 921:2014).

Príklad použitia vedeckej metódy na zistenie príčiny vzniku požiaru



Obrázok 11-1 Aplikácia vedeckej metódy na zisťovanie príčin vzniku požiarov (NFPA 921:2014)

Zisťovateľ by mal identifikovať palivá prítomné v oblasti vzniku požiaru. Jedno z týchto palív bolo iniciované ako prvé. Druh, množstvo a špecifické rozmiestnenie paliva by malo byť identifikované. Občas sa môže stať, že časť paliva, ktoré bolo iniciované ako prvé nezhorí úplne, ale často toto palivo úplne vyhorí. Komponenty vo väčšine staveb nie sú citlivé na zapálenie iniciačnými zdrojmi s nízkou energiou, teplotu alebo časom pôsobenia. Napr. podlahy, stavebné drevo, drevené skrine a koberce môžu byť zapálené len iniciačným zdrojom s relatívne vysokou energiou (NFPA 921:2014).

V procese zisťovania je potrebné identifikovať a dokumentovať všetky prvky (napr. zariadenia) produkujúce teplo v oblasti vzniku požiaru. Teplo produkujúce prvky zahŕňajú prístroje, spotrebiče, zariadenia a reaktívne materiály a materiály so sklonom k samovznieteniu. Zisťovateľ by mal tiež identifikovať prístroje a zariadenia, ktoré normálne neprodukujú teplo, ale môžu uvoľniť dostatok tepla na iniciáciu kvôli nesprávnemu použitiu alebo poruche (NFPA 921:2014).

Pri identifikovaní prvkov a aktivity v oblasti vzniku požiaru by informácie mali byť získané od vlastníka a zamestnancov o aktivitách (činnostiach) a spotrebičoch, prístrojoch alebo zariadeniach produkujúcich teplo v oblasti vzniku požiaru. Tieto informácie sú obzvlášť dôležité vtedy, keď potenciálny zdroj iniciácie nie je po požiari identifikovateľný (NFPA 921:2014).

Najčastejšie sa vyskytujúcim oxidačným prostriedkom je vzdušný kyslík. V určitých prípadoch je potrebné počítat s výskytom kyslíka s vyššou koncentráciou (napr. v pretlakových komorách, kyslíkových stanoch a skladovacích zariadeniach) (NFPA 921:2014).

Zisťovateľ by mal získať údaje, ktoré umožňujú vykonať analýzu udalostí, ktoré zapríčinili vzájomnú interakciu paliva a oxidačného prostriedku (sekvencia iniciácie). Tieto údaje môžu byť k dispozícii z pozorovania, svedeckej výpovede alebo z údajov o počasi (NFPA 921:2014).

Vedecká metóda vyžaduje, aby všetky zozbierané údaje týkajúce sa príčiny vzniku požiaru boli analyzované. Analýza dát vyžaduje skúšanie a interpretáciu každého údaja týkajúceho sa príčiny vzniku požiaru. Toto je dôležitý krok, ktorý musí predchádzať formovaniu akejkoľvek hypotézy. Cieľom analýzy je priradiť špecifický význam výsledkom skúšok a interpretovať proces ktorý hral rozhodujúcu úlohu pri stanovení a testovaní hypotézy. Identifikácia, zhromažďovanie a katalógizácia dát nemá byť stotožnené s analýzou dát. Analýza dát je založená na znalostiach, tréningu, skúsenostiach a odbornosti osoby vykonávajúcej analýzu. Ak zisťovateľ nemá vedomosti z určitej oblasti pre interpretáciu určitých dát, mal by sa obrátiť na osobu s potrebnými znalosťami. Porozumenie významu údajov umožňuje zisťovateľovi vytvárať hypotézy na základe dôkazov a nie na základe špekulácií (NFPA 921:2014).

Analýza dát zahŕňa analýzu paliva, iniciačného zdroja, oxidačného prostriedku a sekvencie iniciácie (NFPA 921:2014).

Analýza paliva zahŕňa posúdenie jeho *geometrie a orientácie, teploty vzplanutia a vznietenia* a jeho *množstva*. Geometria a orientácia paliva má významný vplyv na jeho sklon k iniciácii. Tuhé horľavé látky s veľkým pomerom povrchu k hmotnosti (merný povrch) majú podstatne väčší sklon k iniciácii ako horľavé látky s malým merným povrchom. Pre posúdenie, či tuhá horľavá látka mohla byť iniciovaná iniciačným zdrojom stanoveným v hypotéze je potrebné poznať jej teplotu vzplanutia a vznietenia. Na rozšírenie požiaru od prvej horiacej látky je potrebné určité minimálne množstvo tejto látky. Súčasťou analýzy paliva by malo byť posúdenie, či jeho množstvo postačovalo na rozšírenie požiaru (NFPA 921:2014).

Okrem teploty vzplanutia a vznietenia je pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov dobre aplikovateľná hodnota kritickej hustoty tepelného toku. Kritická hustota tepelného toku umožňuje posúdenie možnosti iniciácie látky alebo materiálu tepelnou konvekciou alebo tepelným žiarením.

Analýza iniciačných zdrojov zahŕňa posúdenie ich *parametrov* a zistenie, ktorý z prítomných potenciálnych iniciačných zdrojov mal potrebnú teplotu, čas pôsobenia a mohol odovzdať dostatok energie na iniciáciu prvého zapáleného paliva (NFPA 921:2014).

Analýza oxidačného prostriedku sa zvyčajne vykonáva len v prípadoch, keď bol okrem vzdušného kyslíka prítomný aj iný oxidačný prostriedok, ktorý mohol mať vplyv na priebeh iniciácie alebo rozvoja požiaru (NFPA 921:2014). Na tomto mieste je však potrebné zdôrazniť, že analýza oxidačného prostriedku môže priniesť cenné údaje aj v prípade, že oxidačným prostriedkom bol vzdušný kyslík. V tomto prípade je predmetom analýzy predovšetkým prístup vzduchu (vzdušného kyslíka) do priestoru zasiahnutého požiarom.

Sekvenca iniciácie požiaru je definovaná ako následnosť udalostí a podmienok, ktoré umožnili vzájomnú interakciu iniciačného zdroja, horľavej látky (paliva) a oxidačného prostriedku, ktorej následkom bol iniciovaný požiar. Pri každom zisťovaní príčin vzniku požiaru musia byť posúdené rôzne faktory, ktoré prispeli k iniciácii požiaru. Medzi uvedené faktory patrí (NFPA 921:2014):

- ako a kedy bola prvá zapálená látka prítomná v potrebnej forme, fáze, konfigurácii a za podmienok, kedy táto mohla byť zapálená,
- ako a kedy bol oxidačný prostriedok prítomný vo forme a množstve potrebnom na vzájomnú interakciu s horľavou látkou a iniciačným zdrojom za vzniku požiaru,
- ako a kedy bol iniciačný zdroj (s dostatočnými parametrami) v interakcii s horľavou látkou,
- ako a kedy iniciačný zdroj (s dostatočnými parametrami) odovzdal horľavej látke dostatok energie na jej zapálenie,
- ako reagovali alebo nereagovali požiarotechnické zariadenia a aký mali vplyv na včasnú detekciu požiaru a jeho priebeh,
- ako a kedy konanie osôb (činnosť, zanedbanie povinností) alebo podmienky spôsobili vzájomnú interakciu horľavej látky, oxidačného prostriedku a iniciačného zdroja,
- ako bola prvá a následne druhá, tretia a následné horľavé látky iniciované až do rozšírenia požiaru.

Ďalším krokom pri zisťovaní príčin vzniku požiaru je **stanovenie hypotéz**. Počas tohto procesu sa stanoví niekoľko hypotéz s ohľadom na každý potenciálny iniciačný zdroj (v mieste vzniku požiaru). Systematické hodnotenie hypotéz následne umožňuje zamietnutie tých, ktoré nie sú podložené (alebo sú vyvrátené) faktami. Počas zisťovania by sa nemali zamietnuť potenciálne iniciačné zdroje len preto, že nevykazujú zjavný dôkaz. Príkladom je chybné zamietnutie elektrického ohrievača len preto, lebo jeho vodiče nevykazujú stopy po elektrickom oblúku alebo kontakty nevykazujú stopy po oxidácii. Zariadenie v mieste vzniku požiaru, ktoré môže počas normálnej prevádzky alebo následkom poruchy produkovať dostatok tepla na zapálenie prítomných horľavých látok by malo byť vždy zaradené v zozname potenciálnych hypotéz (NFPA 921:2014).

Predposledným krokom je **testovanie stanovených hypotéz**. Každá hypotéza musí byť testovaná požitím vedeckej metódy. Ak je výsledkom testovania, že jedna z hypotéz má vysokú mieru pravdepodobnosti (v porovnaní s ostatnými) považuje sa táto za príčinu vzniku požiaru. Stanovené hypotézy sa testujú deduktívnym postupom. Pri tomto postupe

sa porovnávajú stanovené hypotézy so všetkými známymi faktami a rovnako s výsledkami vedeckého výskumu, ktoré sú relevantné k predmetnému požiaru. Vo fáze testovania stanovených hypotéz je potrebné odpovedať na nasledovné otázky (NFPA 921:2014):

1. Má hypotetický iniciačný zdroj dostatočné parametre na iniciovanie prvej zapálenej horľavej látky?
2. Je indukčná perióda iniciácie prvej zapálenej horľavej látky konzistentná s hypotetickou príčinou a zistenými faktami?
3. Aké boli okolnosti interakcie medzi prvou zapálenou horľavou látkou a iniciačným zdrojom?
4. Aké zlyhanie (porucha) predchádzalo iniciácii?

Vo fáze testovania hypotéz je potrebné sa sústrediť na vyvrátenie stanovených hypotéz (nie na ich potvrdenie). Hypotézy, ktoré nie je možné na základe známych faktov, výsledkov vedeckého výskumu a výsledkov laboratórnej analýzy odobratých vzoriek vyvrátiť, môžu byť považované za pravdepodobné (NFPA 921:2014).

Proces vylučovania jednotlivých hypotéz je integrálnou súčasťou vedeckej metódy. Alternatívne hypotézy musia byť formulované a menené výlučne na základe faktov (NFPA 921:2014).

Po testovaní všetkých stanovených hypotéz je potrebné posúdiť celý proces a uistiť sa, že všetky spoľahlivé dáta boli zobrazené do úvahy. Kritická otázka je, či existuje alternatívna hypotéza, ktorá je v súlade so známymi údajmi. V procese výberu finálnej hypotézy je potrebné dokumentovať všetky fakty na základe ktorých bola zvolená finálna hypotéza uprednostnená pred ostatnými (ktoré rovnako sú v súlade so známymi faktami). Na tomto mieste je potrebné upozorniť, že nie všetky dáta majú v procese testovania a výberu finálnej hypotézy rovnakú hodnotu (NFPA 921:2014).

11.2.1.

Zisťovanie príčin vzniku požiarov automobilov

Špecifickým prípadom požiarov z hľadiska zisťovania príčin vzniku sú požiare automobilov. Uvedená špecifickosť je daná vyšším podielom úmyselne spôsobených požiarov, rozdielnymi charakteristickými stopami po požiari a vyššou rýchlosťou rozvoja požiaru v porovnaní s požiarmi v stavbách.

Automobily sú ďalej charakteristické vysokou koncentráciou variabilných horľavých látok na relatívne malej ploche (v malom objeme). Požiarne zataženie automobilu tvoria horľavé kvapaliny (predovšetkým palivo a oleje) a organické polyméry – predovšetkým plasty (pneumatiky, materiály tvoriace interiér vozidla a prípadne náklad). Okrem toho v automobiloch na pohon plynnými palivami (predovšetkým LPG – Light Petroleum Gas v menšej miere CNG – Compressed Natural Gas, ale používajú sa aj iné plynné palivá – napr. vodík) je významná časť požiarneho zataženia tvorená aj plynnými horľavými látkami. Pomerne špecifickú skupinu z hľadiska zisťovania príčin vzniku požiarov tvoria elektromobily a automobily s hybridným pohonom.

Medzi iniciačné zdroje v automobiloch patrí (NFPA 921:2014):

1. Otvorený plameň. Najčastejším zdrojom otvoreného plameňa je spätné vyšľahnutie plameňa z karburátora, ale moderné vozidlá ho už nepoužívajú.
2. Elektrické zdroje. Pri vypnutom motore je jediným dostupným zdrojom elektrická energia z batérie. Na batériu sú pripojené niektoré komponenty aj keď je zapalovanie vypnuté. Medzi tieto komponenty patrí alternátor, štartér motora, poisťková skri-

ňa, cigaretový zapalovač, elektricky nastaviteľné sedadlá, elektrické otváranie okien, elektrické uzatváranie dverí, svetlá, nastavenie spätných zrkadiel a spínač zapalovania. Uvedené komponenty môžu zlyhať aj pri nenaštartovanom automobile. Naštartované vozidlo má oveľa viac potenciálnych zdrojov elektrickej energie. V systémoch s jednosmerným prúdom býva rám kovovej karosérie a motor pripojený na záporný pól batérie. To znamená, že elektrické zariadenie pripojené na kovové časti vozidla môžu byť fyzicky napojené na jeden kábel. Na uzatvorenie okruhu (skrat) teda postačuje kontakt kladného pólu s kovovou časťou karosérie. Medzi poruchy elektroinštalácie v automobiloch patria:

- a) Preťaženie elektrických káblov. K preťaženiu elektrického kábla dochádza pri jeho väčšom prúdovom zaťažení na aké je tento kábel nadimenzovaný. Následkom preťaženia sa môže stať, že teplota vodiča dosiahne teplotu vznietenia izolácie, čo je nebezpečné hlavne vo zväzkoch káblov, kde ľahšie dochádza ku kumulácii tepla.
 - b) Zvýšený prechodový odpor. Spojenia so zvýšeným prechodovým odporom vznikajú pri slabom alebo neúčinnom spojení medzi vodičmi a koncovými spotrebičmi.
 - c) Elektrický skrat a elektrický oblúk. K elektrickému skratu môže dôjsť následkom poškodenia izolácie vodiča (napr. jej opotrebením, popraskaním a pod.) a následným kontaktom s uzemnenou časťou (napr. kovová časť karosérie pripojená na záporný pól batérie).
 - d) Žiarovky a rozžeravené vlákna. Povrch žiaroviek môže vyprodukovať dostatočné teplo na zapálenie niektorých horľavých materiálov, ktoré sa s nimi dostanú do kontaktu. Rozžeravené vlákna z prasknutých žiaroviek môžu byť tiež zdrojom vznietenia horľavých plynov a pár, horľavých kvapalín (najmä benzínu). Vlákna reflektorov majú teplotu asi 1400 °C, ale väčšina pracuje vo vákuu alebo v inertnej atmosfére. Ak dôjde ku kontaktu s okolitým vzduchom žeravenie trvá len pár sekúnd a potom vlákno prehorí.
 - e) Externé elektrické zdroje používané vo vozidlách. Väčšina elektrických zdrojov sa nachádza priamo vo vozidle, existujú však situácie, kedy sa elektrická energia dodáva do vozidla z vonkajšieho zdroja. Ako príklad je možné uviesť elektrické doplnkové zariadenia v karavanoch a ťahačoch, ohrievače bloku motora, ohrievače interiéru vozidla a nabíjačky batérií.
3. Horúce povrchy. Zberné výfukové potrubia a súčasti môžu dosiahnuť dostatočne vysoké teploty na odparenie alebo zapálenie horľavej kvapaliny. Kvapalina automatickej prevodovky, hlavne ak je zahriata následkom preťaženia prevodu, sa môže vznietiť od horúceho potrubia. Motorový olej a určité brzdové kvapaliny kvapkajúce na horúce potrubia sa tiež môžu zapáliť. Tieto kvapaliny sa môžu po vypnutí motora vznietiť len krátky čas. Vnútorne časti katalyzátora majú operačnú teplotu asi 700 °C za normálnej prevádzky. Táto teplota môže byť oveľa vyššia, ak sa do katalyzátora dostane nedokonale spálené palivo v dôsledku chybných funkcií palivového alebo zapalovacieho systému. Teploty vonkajšieho povrchu katalyzátora môžu za normálnej prevádzky dosahovať až 315 °C. Pri obmedzenej ventilácii vzduchu môžu byť ešte vyššie. Rovnako povrchová teplota potrubia tesne pred katalyzátorom býva obyčajne vyššia ako teplota v samotnom katalyzátore. Pri posudzovaní vznietenia benzínu od horúcich povrchov je potrebné brať do úvahy, že takéto vznietenie nastáva s nízkou pravdepodobnosťou, ale nie je ho možné celkom vylúčiť.

4. Mechanické iskry. Vzájomný kontakt kovov (železo, oceľ alebo horčík) alebo kontakt kovu s povrchom cesty môže vytvárať iskry trením s dostatočnou energiou na zapálenie plynov, pár a rozprášených kvapalín. K vzájomnému kontaktu kovov dochádza pri pohone remenice, pohone hriadeľov alebo v ložiskách. Typický príklad kontaktu kovu s povrchom cesty predstavuje zlomená súčiastka, napr. hnací hriadeľ kola alebo výfuk. Bolo zistené, že pri rýchlosti $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ môžu mechanické iskry dosahovať teplotu až $800 \text{ }^\circ\text{C}$ (oranžové iskry). Pri vyšších rýchlostiach vznikajú biele iskry s teplotou $1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Iskry z kontaktu hliníka s povrchom cesty nepredstavujú u väčšiny materiálov zdroj zapálenia, z dôvodu pomerne nízkej teploty tavenia hliníka. Malá hmotnosť iskier limituje množstvo energie, ktoré majú na zapálenie materiálov s ktorými sú v kontakte. Iskry sa tiež rýchlo ochladzujú, hlavne ak letia cez vzduch, čo ďalej obmedzuje rýchlosť prenosu tepla na materiály, s ktorými prídu do kontaktu. Z týchto dôvodov je nízka pravdepodobnosť, aby iskry zapálili tuhé materiály.
5. Fajčiarske potreby. Tkaniny a materiály čalúnenia v nových automobiloch je vo všeobecnosti ťažké zapáliť horiacou cigaretou. K zapáleniu môže dôjsť, ak zapálená cigareta horí na papieri, vreckovke alebo inom materiáli alebo ak materiál sedadla príde do kontaktu s otvoreným plameňom.

Na tomto mieste je potrebné upozorniť, že niektoré elektrické obvody v automobile (napr. obvod štartéra) nie sú chránené žiadnym istiacim prístrojom (poistkou). Ak v takomto obvode nastane elektrický skrat, tak nebude prerušený istiacim prístrojom a s pomerne vysokou pravdepodobnosťou môže spôsobiť požiar.

Preskúvanie vozidla po požiari je komplexná a mnohostranná činnosť. Rovnako ako v prípade požiarov stavebných konštrukcií je v prvom rade potrebné zistiť miesto vzniku požiaru. Väčšina motorových vozidiel sa dá rozdeliť na tri časti: priestor motora, priestor pre cestujúcich (interiér vozidla) a nákladný priestor (NFPA 921:2014).

Preskúvanie exteriéru môže odhaliť významné stopy po požiari. Miesto vzniku požiaru a spôsob, ako na to reagovalo čelné sklo, môžu pomôcť pri určení priestoru vzniku požiaru. Požiar v priestore pre cestujúcich zvyčajne spôsobí poškodenie v hornej časti čelného skla a zanechá radiálne stopy horenia (stopy horenia, ktoré sa javia ako radiálne z tohto priestoru) na stropnú časť kabíny vozidla (NFPA 921:2014).

Požiar v priestore motora sa môže rozšíriť do priestoru pre cestujúcich (interiér vozidla) cez jestvujúce otvory v prepážke medzi priestorom motora a interiérom vozidla. Charakteristické preň je, že spôsobuje poškodenie na spodnej časti čelného skla, často na strane spolujazdca. Často vidno na dverách radiálne stopy požiaru z priestoru motora (NFPA 921:2014).

11.2.2.

Zisťovanie príčin vzniku lesných požiarov

Ďalším špecifickým prípadom požiarov z hľadiska zisťovania príčin vzniku sú lesné požiare. Špecifikom týchto požiarov (v porovnaní s požiarimi v stavbách) je predovšetkým vplyv vonkajších (meteorologických) podmienok na ich priebeh. Pri tom si je potrebné uvedomiť, že priebeh požiaru nie je významne ovplyvnený len meteorologickými podmienkami počas samotného požiaru, ale aj podmienkami pred jeho vznikom. Napr. dlhotrvajúce teplé a suché počasie významným spôsobom zvyšuje pravdepodobnosť vzniku lesného požiaru a naopak daždivé obdobie alebo snehová pokrývka sú faktory

takmer vylučujúce vznik lesného požiaru. V prípade vnútorných požiarov alebo požiarov stavieb však prakticky neexistujú vonkajšie (meteorologické) podmienky, ktoré by vylučovali vznik požiaru. Ďalším významným rozdielom je skutočnosť, že zatiaľ čo v množstve stavieb alebo parkovísk existuje aspoň čiastočná evidencia pohybu osôb (napr. kontrola vstupu na vrátnici) vo voľnej prírode (v lesoch a trvalo trávnatých lúčkach a pasienkoch) je pohyb osôb prakticky voľný. Tento fakt sťažuje aj samotný proces zisťovania príčin vzniku požiaru. Z pohľadu zisťovania príčin vzniku požiarov je však kľúčový rozdiel v stopách po vnútornom požiari a po lesnom požiari. Medzi uvedenými typmi požiarov je rozdiel predovšetkým v stopách indikujúcich miesto vzniku a smer šírenia požiaru. Ďalšia časť tejto podkapitoly bude preto zameraná na túto oblasť.

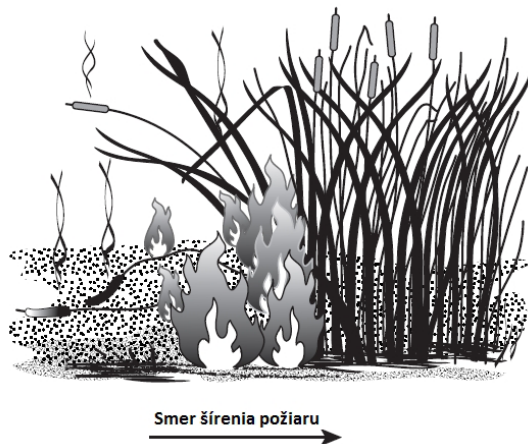
Stopy po smere šírenia požiaru sa zachovávajú predovšetkým na čiastočne zhorenom palive a nezhorených objektoch. Vizualne môže byť účinok požiaru odhadnutý z rozdielneho poškodenia, vzorov zuhoľnatenia, zmeny (straty) farby, zachytenia sadzí, tvarov, umiestnenia a podmienok nezhoreného paliva. Analýza smeru šírenia umožňuje zistenia ciest a spôsobu šírenia požiaru. Aplikovaním systematického prístupu je možné vystopovať cestu šírenia požiaru a miesto jeho vzniku (NFPA 921:2014).

NFPA 921:2014 delí stopy šírenia lesného požiaru na: stopy (vzorky) tvaru V, stupeň poškodenia, stopy na tráve (bylinách), uhoľ zuhoľnatenia, biely popol, prichľbiny, miznúce vzory, kryté a nekryté palivá, usadenie dechtu a sadzí, hĺbka zuhoľnatenia, drobenie kameňa, zmrznutie lístia a pokrútenie lístia.

Stopy (vzory) tvaru V sú horizontálne zhorené (vyhorené) vzory na povrchu pôdy spôsobené šírením požiaru. Tieto stopy nemôžu byť zamieňané so stopami tvaru V spôsobenými splodinami horenia vo vnútornom priestore. Tieto stopy sú ovplyvnené smerom a rýchlosťou prúdenia vetra a sklonom terénu a paliva. Miesto vzniku požiaru sa často nachádza v blízkosti základne alebo najužšom bude vzoru tvaru V (NFPA 921:2014).

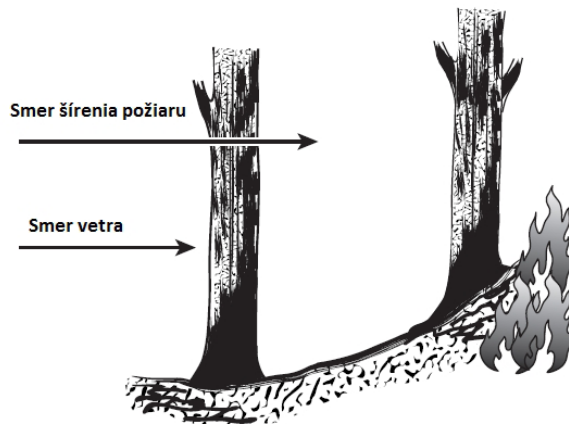
Stupeň poškodenia indikuje intenzitu, trvanie a smer šírenia požiaru. Listy, vetvy a kónary vykazujú väčší rozsah poškodenia zo strany z ktorej sa šírila požiar (NFPA 921:2014).

Stopy na tráve umožňujú stanovenie smeru šírenia požiaru. Tráva ležiaca v smere šírenia je obyčajne úplne spálená (nezanecháva žiadne stopy). Tráva rastúca v zhlukoch nemusí byť vždy úplne spálená a následne je z jej polohy možné usudzovať na smer šírenia požiaru. Zvyšky trávy v tomto prípade ležia v smere z ktorého sa šírila požiar (obr. 11-2) (NFPA 921:2014).

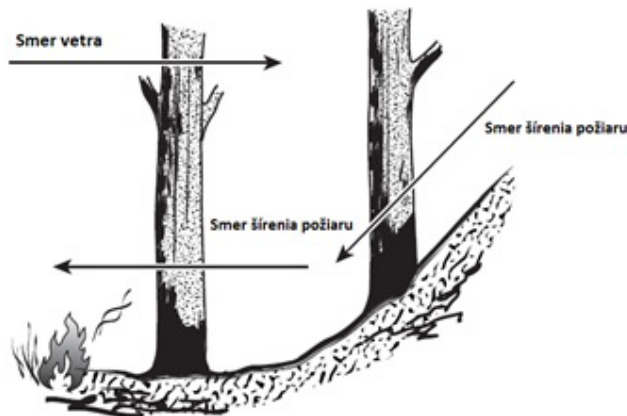


Obrázok 11-2 Príklad stoniek trávy indikujúcich smer šírenia požiaru (NFPA 921:2014)

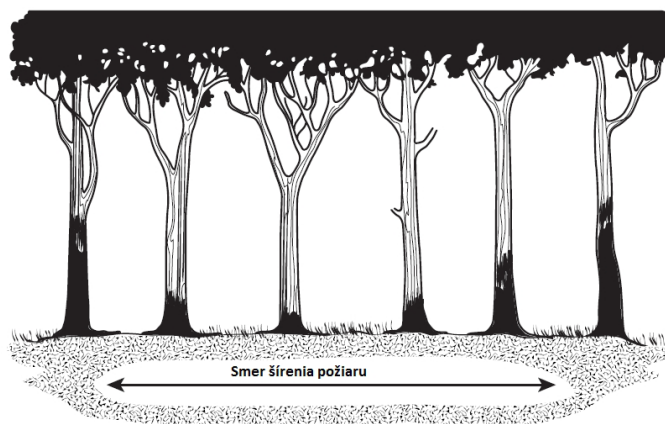
Uhol (sklon) zuhoľnatenia sa na základe druhu zuhoľnateného paliva delí do dvoch skupín. Zuhoľnatenie paliva môže nastať v stĺpovom palive (napr. kmene stromov alebo stĺpiky plotu) alebo v listovej, príp. ihličnatej korune stromu. Stĺpové palivo horí pod uhlom, ktorý korešponduje s uhlom plameňa a výškou spojenou s rozvojom požiaru. Spoľahlivosť je vyššia v prípade osamelo stojacej vzorky na voľnom priestranstve. Na vertikálnom stĺpovom palive vytvára vzdušný vír zuhoľnatenie pod charakteristickým uhlom na strane odvrátenej od smeru šírenia požiaru. Využitie uhla zuhoľnatenia stĺpového paliva (kmeňov stromov a stĺpikov plotov) pri zistení smeru šírenia požiaru ilustrujú obr. 11-3 a 11-4. V listnatej korune plameň spáli palivo v uhle zhodnom so smerom šírenia požiaru. Vracajúci sa požiar (následkom pôsobenia vetra) zanecháva uhol zuhoľnatenia paralelný so sklonom terénu. Postupujúci požiar zanecháva uhol zuhoľnatenia strmší, ako sklon terénu. Aplikáciu uhla zuhoľnatenia v korune pri zistení smeru šírenia požiaru ilustrujú obr. 11-5 a 11-6 (NFPA 921:2014).



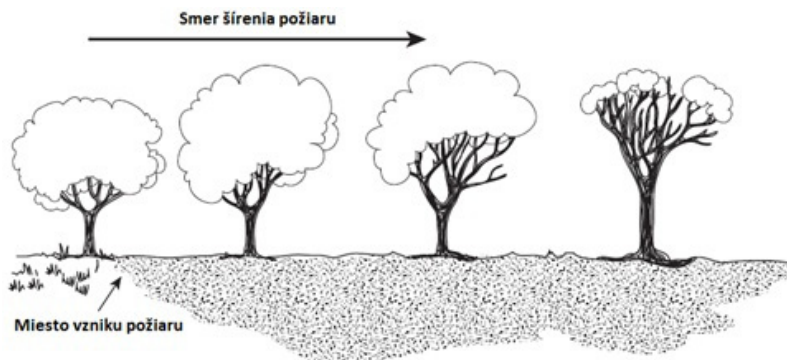
Obrázok 11-3 Stopy zuhoľnatenia pri šírení sa požiaru proti sklonu terénu v smere vetra (NFPA 921:2014)



Obrázok 11-4 Stopy zuhoľnatenia pri šírení požiaru v smere sklonu terénu proti smeru vetra (NFPA 921:2014)



Obrázok 11-5 Príklad vzorov zuhoľnatia vytvorených šírením požiaru (NFPA 921:2004)

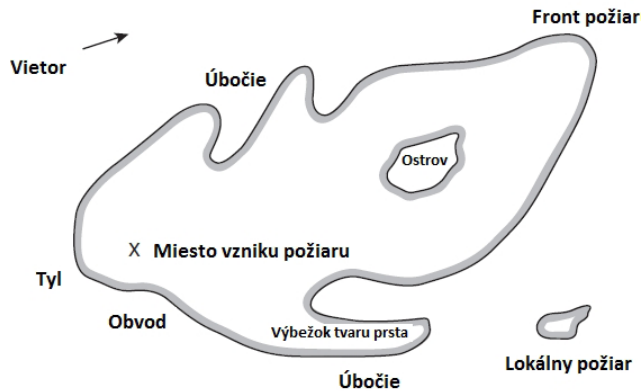


Obrázok 11-6 Progresívny nárast zhorenia koruny stromov od miesta vzniku požiaru v smere jeho šírenia (NFPA 921:2014)

Biely popol je medziprodukt horenia. Viac bieleho popola sa vytára na strane zaťaženej vyššou teplotou (väčším množstvom tepla a plameňmi) (NFPA 921:2014).

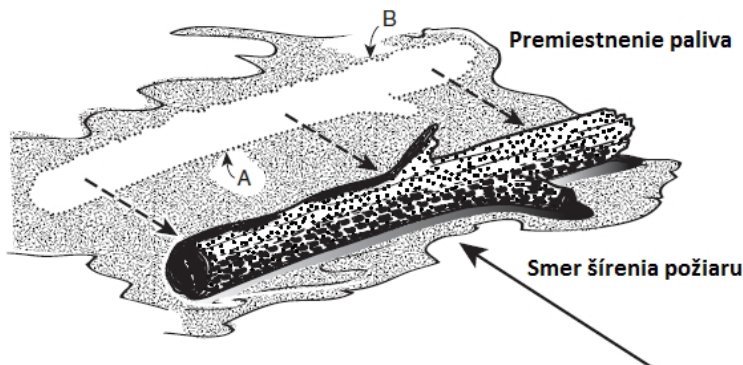
Prehĺbeniny sú konkávne alebo konvexné tvary na koncoch (vrchnej časti) pňov. Pne na ploche, zo strany z ktorej sa šíril požiar vykazujú tupý alebo zaguľatený tvar. Na opačnej strane vykazujú ostro špicatý alebo kužeľovitý tvar (NFPA 921:2014).

Ako sa požiar šíri na rôzne druhy paliva, plochy s palivom s vyšším obsahom vlhkosti alebo plochy na ktorých dochádza k poklesu rýchlosti šírenia alebo intenzity požiaru môžu spôsobiť spomalenie šírenia požiaru alebo jeho samovoľné uhasenie (**miznúce vzory**). Tieto plochy majú tvar prstov alebo ostrovov nezhořeného alebo čiastočne zhoreného paliva. Tieto plochy sú často spájané s postranným alebo spätným šírením plameňa, ale nemôžu byť označené za miesto vzniku požiaru. Tieto vzory sú užitočný indikátor na posúdenie rozvoja požiaru v makroskopickom meradle. Tieto vzory sú znázornené na obr. 11-7 (NFPA 921:2014).



Obrázok 11-7 Makroskopický pohľad na lesný požiar (NFPA 921:2014)

Nehorľavé materiály alebo objekty tienia neexponovanú stranu paliva pred tepelným žiarením (poškodením). Objekt na povrchu chráni palivo pred expozíciou teplom z požiaru. Povrch paliva na exponovanej strane vykazuje ostrú deliacu čiaru (medzi zhoreným a nezhoreným palivom). Naopak na odvrátenej strane je deliaca čiara medzi zhoreným a nepoškodeným palivom neostrá a nerovná (obr. 11-8).



Obrázok 11-8 Priama a rovná čiara (A) zo strany šírenia požiaru a neostrá a nerovná čiara (B) na strane odvrátenej od smeru šírenia požiaru (NFPA 921:2014)

Usadzovanie dechtu je spôsobené horúcimi plynmi, živcami a olejmi kondenzujúcimi na povrchoch chladnejších objektov. **Sadze** vznikajú v dôsledku nedokonalého horenia. Usadzovanie dechtu a sadzí nastáva predovšetkým na strane objektu exponovaného plameňom. Sadze a decht sa usadzujú na objektoch predovšetkým zo smeru šírenia požiaru (NFPA 921:2014).

Zuhoľnatená vrstva na konároch, kmeňoch a stavebnom dreve vytvára popraskaný a šupinatý vzhľad. Platí, že strana s najhlbším zuhoľnatením je strana exponovaná šíriacim sa požiarom (NFPA 921:2014).

Drobenie kameňa sa prejavuje ako krátery s jemnou zemnou farbou alebo odlúpené časti na povrchu kameňa spôsobené požiarom. K drobeniu kameňa dochádza v smere šírenia požiaru (NFPA 921:2014).

Keď je lístie a malé (tenké) kmene vystavené teplu (hlavne z plochy šíriaceho sa požiaru) mäknú a ohýňajú sa v smere vetra (alebo pudenia vzduchu) vyvolaného požiarom. Toto **lístie a tenké kmene často ostáva po ochladení v tejto ohnutej pozícii**.⁴ Táto vlastnosť sa dá využiť pri odhade prevažného smeru vetra počas požiaru, nie však na exaktné posúdenie smeru šírenia požiaru (NFPA 921:2014).

Ku krúteniu zeleného lístia dochádza v smere k tepelnému zdroju. K tomuto javu dochádza predovšetkým pri pomalšom prúdení, menej intenzívnom (vzdialenejšom) požiari spojenom so spätným a bočným šírením (NFPA 921:2014).

Po stanovení miesta vzniku požiaru na základe vyššie popísaný stôp sa príčina vzniku požiaru stanovuje postupom prakticky zhodným s postupom na obr. 11-1.

⁴ V anglicky písanej odbornej literatúre sa pre tento jav používa odborný termín freeze – zamrznúť.

12

Štatistika požiarovosti

Väčšina vedeckých a odborných knižných publikácií zameraných na zisťovanie príčin vzniku požiarov začína štatistikou požiarovosti. V tejto publikácii sme zvolili odlišný postup a zaradili sme štatistiku až nakoniec. Dôvodom je logický postup zisťovania príčin vzniku požiarov a dôvody pre ktoré sa robí. Hlavným dôvodom zisťovania príčin vzniku požiarov v Hasičskom a záchrannom zbore MV SR je vykonanie opatrení na úseku ochrany pred požiarom za účelom zníženia počtu požiarov, spracovanie a vedenie štatistiky požiarovosti a vyvodenie dôsledkov voči zodpovedným osobám (v oblasti priestupkov). Štatistika požiarovosti je teda až jedným z výsledkov (finálnych výstupov) zisťovania príčin vzniku požiarov. Štatistika požiarovosti by nemala vstupovať do procesu zisťovania príčin vzniku požiarov a nesmie ovplyvňovať osoby vykonávajúce zisťovanie. Každú príčinu vzniku požiaru je potrebné zistiť bez prihliadania na štatistiku (o ktorej by zisťovateľ mohol mylne predpokladať, že vyjadruje mieru pravdepodobnosti s akou mohla byť tá ktorá hypotéza o príčine vzniku požiaru správna). Je pravda, že z makro pohľadu štatistika požiarovosti skutočne vyjadruje pravdepodobnosť tej ktorej príčiny vzniku požiaru (a takto sa získané výsledky aj uplatňujú pri tvorbe právnych predpisov na úseku ochrany pred požiarom), ale pri zisťovaní príčiny vzniku požiaru v konkrétnom prípade je potrebné brať do úvahy len fakty, bez prihliadania na štatistický rozbor požiarovosti.

Jedným z dôvodov, prečo bola táto kapitola do publikácie zaradená je potreba vysvetlenia rozdielnosti vedenia štatistiky požiarovosti v rôznych štátoch. Existujú totiž rôzne zdroje, ktoré porovnávajú počty požiarov, výšku priamych a následných škôd, počty zranených a usmrtených osôb po prepočte na určitý počet obyvateľov (napr. na 1 000 000 obyvateľov) v rôznych štátoch. Porovnaním takýchto štatistík však automaticky nezískame údaj o kvalite ochrany pred požiarom v tej ktorej krajine. Na exaktné porovnanie štátov je totiž potrebné poznať spôsob vypracovania a vedenia štatistiky (napr. v jednom štáte sa do počtu usmrtených osôb požiarom nepočítajú osoby usmrtené požiarom počas dopravnej nehody zatiaľ čo v inom áno alebo v jednom štáte sa do počtu usmrtených osôb požiarom počítajú len osoby, ktoré boli usmrtené požiarom na mieste požiaru zatiaľ čo v inom sa počítajú aj osoby, ktoré zomreli následkom požiaru aj neskôr po expozícii – napr. počas hospitalizácie). Počet požiarov, ako aj počet obyvateľov a počet usmrtených a zranených osôb v 16 štátoch Európskej únie ilustruje tabuľka 12-1.

Podstate väčšiu aplikáciu, ako porovnanie úrovne ochrany pred požiarom v jednotlivých štátoch, má štatistika požiarovosti pri posudzovaní rizík spojených s požiarom. V klasickej teórii rizík sa riziko definuje ako pravdepodobnosť vzniku neželanej udalosti (napr. vzniku požiaru) a stupňa jej následkov (napr. počet usmrtených alebo zranených osôb a výška škôd na majetku).

Pre potreby posúdenia rizík spojených s požiarom je však potrebné získať podstatne precíznejšie dáta, než len počet požiarov, počet usmrtených a zranených osôb a výšku

škôd. Na takéto využitie je potrebné získať údaje osobitne pre rôzne druhy stavieb (napr. stavby na bývanie, ubytovanie, administratívne priestory, školy, priemyselné prevádzky rozdelené do jednotlivých odvetví atď.). Okrem toho je potrebné viesť štatistiku aj v závislosti od základných parametrov stavby (predovšetkým horľavosť konštrukčného celku, počet podlaží stavby, obsadenie osobami) a miery zavinenia vzniknutých požiarov (úmyselné spôsobenie požiaru, požiar z neobľahostivosti a požiar vzniknutý z objektívnej príčiny). Užitočné sú aj údaje o pravdepodobnosti aktivácie požiarotechnických zariadení (najmä stabilné hasiace zariadenie, zariadenie na odvod tepla a splodín horenia a elektrická požiarová signalizácia) a ich vplyv na priebeh požiaru.

Tabuľka 12-1 Štatistika obetí požiarov v 16 štátoch Európskej únie

Štát	Počet obyvateľov (mil.)	Počet požiarov (-)	Počet usmrtených (-)	Počet zranených (-)	Počet usmrtených na 1 mil. obyvateľov (-)
Česko	10,2	21 192	126	918	12
Dánsko	5,4	6 612	86	11	16
Estónsko	1,4	41 474	127	106	91
Fínsko	5,2	3 313	110	66 000	21
Francúzsko	60	116 134	800	N	13
Litva	3,5	15 111	233	242	66
Lotyšsko	2,4	4 311	195	N	81
Maďarsko	10,1	15 121	157	598	15
Nórsko	4,6	2 626	57	N	12
Poľsko	38	27 418	486	2 940	13
Portugalsko	10	7 749	39	535	4
Rakúsko	8	28 923	28	228	3,5
Grécko	11	5 972	39	174	3,5
Slovinsko	1,9	3 921	17	123	9
Švédsko	9	9 700	65	720	7
Spojené kráľovstvo	59,6	96 600	532	11 300	9

Prameň: Dvořák a kol. (2007)

Podrobný prehľad o využití štatistiky požiarovosti pre potreby požiarneho inžinierstva uvádzajú vo svojej vedeckej práci Klučka a Mózer (2014).

V štatistickej ročenke HaZZ MV SR sa sledujú príčiny vzniku požiarov v 9 hlavných kategóriách, pričom každá kategória (okrem kategórie nezistené príčiny) sa ďalej rozdeľuje na podkategórie. Uvedené hlavné kategórie sa delia na (štatistická ročenka HaZZ MV SR 2010 – 2012):

- úmysel,
- deti a choromyseľné osoby,
- nedbalosť a neopatrnosť dospelých osôb,
- porucha, nevyhovujúci stav vykurovacích telies, dymovodov a komínov,
- prevádzkovo-technické poruchy,

- samovznietenie,
- výbuchy s následným požiarom,
- ďalšie sledované príčiny (do tejto kategórie patrí napr.: blesk, dopravná nehoda, vojenské cvičenie, používanie zábavnej pyrotechniky fyzickou osobou, znovurozho-
- nezistené príčiny.

Iniciátori vzniku požiaru sa v štatistickej ročenke HaZZ MV SR delia do 8 hlavných kategórií (štatistická ročenka HaZZ MV SR 2010 – 2012):

- vnútorný rozvod elektrickej energie,
- vonkajší rozvod elektrickej energie,
- elektrické spotrebiče,
- spotrebiče na tuhé palivá,
- spotrebiče na kvapalné palivá,
- spotrebiče na plynné palivá,
- časti dopravných prostriedkov a pracovných strojov,
- predmety s otvoreným ohňom (žeravou časťou).

Okrem toho je v štatistickej ročenke HaZZ MV SR sledovaný rozbor požiarovosti podľa odvetvia ekonomických činností.

Záver

Zisťovanie príčin vzniku požiarov je najzložitejšou úlohou na úseku ochrany pred požiarmi. Osoba vykonávajúca túto činnosť musí mať vedomosti predovšetkým z dynamiky rozvoja požiaru a stanovovania požiarnotechnických charakteristík horľavých látok, ale aj z právnych predpisov, kriminalistiky, elektrotechniky, chémie (predovšetkým chémie horenia a analytickej chémie), fyziky (predovšetkým v oblasti prenosu tepla), matematiky a strojárstva (predovšetkým v oblasti konštrukcie automobilov). Ďalšiu významnú časť vedomostí, pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov, predstavuje znalosť stôp vytváraných požiarmi (a prípadne stôp zanechanými páchatelmi v prípade úmyselného spôsobenia požiaru) a postupu zisťovania príčin vzniku požiarov.

Uvedený rozsah je tak široký, že na jeho vyčerpávajúce pokrytie by bol potrebný rozsah niekoľko zväzkovej knihy a mohol by byť samostatným trojstupňovým univerzitným študijným programom. Rozsah a zameranie predkladanej vysokoškolskej učebnice boli preto zvolené tak, aby postačoval poslucháčom všetkých trochu stupňov univerzitného štúdia na úspešné zloženie skúšky, prípadne štátnej skúšky, z predmetov zameraných alebo súvisiacich so zisťovaním príčin vzniku požiarov a uľahčil štúdium častí vybraných predmetov (predovšetkým porozumenie ich aplikácie pre potreby zisťovania príčin vzniku požiarov), zameraných predovšetkým na dynamiku rozvoja požiaru, chémiu horenia a hasiacich látok, požiarne skúšobníctvo, požiarnu bezpečnosť stavieb a právne predpisy v ochrane pred požiarmi. Rozsah učebnice bol ďalej zvolený tak, aby poskytol poslucháčom všetkých troch stupňov univerzitného štúdia dostatok vedomostí na to, aby mohli v predmetnom odbore samostatne pracovať a rozvíjať získané vedomosti.

Pod'akovanie

Predložená publikácia vznikla vďaka finančnej podpore Kultúrnej a edukačnej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky, pre projekt 002STU-4/2013 s názvom „Vybudovanie výučbového laboratória pre rekonštrukciu požiarov v laboratórnej mierke“.

Zoznam bibliografických odkazov

- ABBASI, T., ABBASI, S. A. 2007. Dust explosions-cases, causes, consequences and control. In: *Journal of Hazardous Materials*. ISSN 0304-3894, 2007, roč. 140, č. 1-2, s. 7-44.
- ADAHCHOUR, M., BEENS, J., VREULS, R., J., J., BRINKMAN, U., A., T. 2006. Recent developments in comprehensive two-dimensional gas chromatography (GCxGC) I.: Introduction and instrumental set-up. In: *Trends in Analytical Chemistry*. ISSN 0165-9936, 2006, roč. 25, č. 5, s. 438-454.
- ALLARDICE, D., J., EVANS, D., G. 1971. The brown coal/water system. Part 2 Water sorption isotherms on bed-moist Yallourun brown coal. In: *Fuel*. ISSN 0016-2361, 1971, roč. 50, č. 3, s. 236-253.
- ALPERT, R., L. 1972. Calculation of response time of ceiling: mounted fire detectors. In: *Fire and Technology*. ISSN 0015-2684, 1972, roč. 8, č. 3, s. 181-195.
- ALPERT, R., L. 1987. Convective heat transfer in the impingement region of a buoyant plume. In: *ASME Journal of Heat Transfer*. ISSN 0022-1481, 1987, roč. 109, č. 3, s. 120-124.
- ALPERT, R., L. 2002. Ceiling jet flows. In: DiNunno, P. J. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3. vyd. Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002. s. 2-18-2-31. ISBN 087765-451-4.
- AN, K., HE, Y., LI, Z., MI, W., W, J. 2012. A study of ignition of timber by incandescent lamp. In: *Journal of Fire Sciences*. ISSN 0734-9041, 2012, roč. 30, č. 6, s. 552-565.
- BABRAUSKAS, V. 2002. Heat release rates. In: DiNunno, P. J. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3. vyd. Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002. s. 3-1-3-37. ISBN 087765-451-4.
- BABRAUSKAS, V. 2003. *Ignition Handbook*. Issaquah: Fire Science Publishers, 2003. 1116 s. ISBN 0-9728111-3-3.
- BABRAUSKAS, V. 2005. Charring rate of wood as a tool for fire investigations. In: *Fire Safety Journal*. ISSN 0379-7112, 2005, roč. 40, č. 6, s. 528-554.
- BABRAUSKAS, V. 2009. Pools. In: Babrauskas, V., Grayson, S., J. *Heat release in Fires*. 2. vyd. London: Interscience Communications, 2009. s. 201-223. ISBN 978-9556548-4-8.
- BABRAUSKAS, V., PARKER, W., J. 1987. Ignitability measurements with the cone calorimeter. In: *Fire and Materials*. ISSN 1099-1018, 1987, roč. 11, č. 1, s. 31-43.
- BAHÝL, V., IGAZ, R. 2010. *Stavebná fyzika*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2010. 161 s. ISBN 978-80-228-2219-0.
- BALOG, K. 1999. *Samovznietenie*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 1999. 133 s. ISBN 80-86111-43-1.
- BALOG, K., JANTO, D. 1998. *Teória a prax požiarnej ochrany: II. diel*. Bratislava: Akadémia policajného zboru v Bratislave, 1998. 100 s. ISBN 80-8054-080-2.
- BALOG, K., KVARČÁK, M. 1999. *Dynamika požáru*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 1999. 96 s. ISBN 80-86111-44-X.
- BELL, S. 2012. *Forensic Chemistry*. 2. vyd. New York: Prentice Hall, 2012. 648 s. ISBN 978-0321765758.
- BENGTSSON, L. 1998. *Flashover, backdraft and smoke gas explosion from a fire service perspective*. Lund: Lund University, 1998. 197 s.
- BHATTACHARYYA, K, K. 1971. The role of sorption of water vapour in the spontaneous heating of coal. In: *Fuel*. ISSN 0016-2361, 1971, roč. 50, č. 4, s. 367-384.
- BLAHOŽ, V., KADLEC, Z. 2000. *Základy sdílení tepla*. 2. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 2000. 110 s. ISBN 80-902001-1-7.

- BLAŽEJ, A. a kol. 1975. *Chémia dreva*. Bratislava: Alfa vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1975. 224 s.
- BLAŽEJ, A., KOŠÍK, M. 1985. *Fytomasa ako chemická surovina*. Bratislava: Veda vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1985. 404 s.
- BROWN, D., J. 1975. *The variation of wood charring rate with irradiance*. Sheffield: Sheffield University, 1975.
- BUČKO, J., OSVALD, A. 1997. *Rozklad dreva teplotom a ohňom*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1997. 100 s. ISBN 80-228-0639-0.
- BUŠTOROVÁ, M., MARTINKA, J., TUREKOVÁ, I. 2011. Vplyv hrúbky na indukčnú periódu vznietenia OSB dosiek. In: *Kolokvium ku grantovým úlohám VEGA*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2001. s. 55-60. ISBN 978-80-228-2221-3.
- BUTLER, C., P. 1971. *Notes on charring rates of wood*. Borehamwood: Fire Research Station, 1971.
- CENTAL CUSTOM LABORATORY. 2002. *Oil Analysis*. [online]. [cit. 2013-07-07]. Dostupné na internete <http://www.customs.go.jp/ccl/e_etc/6.htm>.
- CRONAUER, D., C., RUBERTO, R., G., SILVER, R., S., JENKINS, R., G., ISMAIL, I., M., K., SCHLYER, R., G. 1983. Liquefaction of partially dried and oxidized coal. In: *Fuel*. ISSN 0016-2361, 1983, roč. 62, č. 10, s. 1116-1123.
- CYGANKIEWICZ, J. 2000. Badanie sklonności ploskich wegli do samozapalenia metoda testu adiabatycznego. In: *Větrání a bezpečnost dolů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2000, s. 22-36.
- C/VM2:2013: Verification method: framework for fire safety design.
- ČERNÝ, V., KLÁN, J., LANKOVÁ, S. 1971. Bilance spotřeby kyslíku při oxidace uhlí. In: *Acta Montana*. ISSN 1234-1910, 1971, č. 14, s. 52-60.
- ČSN 332030:2004: Elektrostatika : Směrnice pro vyloučení nebezpečí od statické elektřiny.
- DAMEC, J. 1998. *Protivýbuchová prevence*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 1998. 188 s. ISBN 80-86111-21-0.
- DAMEC, J. a kol. 1999. *Protivýbuchová prevence v potravinářství a zemědělství*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 1999. 182 s. ISBN 80-86111-41-5.
- DIN 51649-1:1986: Determination of the explosion limits of gases and gas mixtures in air.
- DRYSDALE, D. 1999. *An Introduction to Fire Dynamics*. 2. vyd. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1999. 451 s. ISBN 0-471-97291-6.
- DRYSDALE, D. 2002. Thermochemistry. In: DiNenno, P. J. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3. vyd. Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002. s. 2-90-1-98. ISBN 087765-451-4.
- DUCHÁČEK, V. 2006. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. 278 s. ISBN: 80-7080-617-6.
- DVOŘÁK, O., ANGELIS, J., BURSÍKOVÁ, P., SUCHÝ, O. 2006. *Laboratorní metody/zařízení pro zkoumání vplyvu prostředí (teploty a obsahu kyslíku) na markanty elektrických zkratu a přechodových odporu u Cu vodičů: dílčí výzkumná zpráva za rok 2006*. Praha: Ministerstvo vnitra České republiky, 2006. 77 s.
- DVOŘÁK, O., ANGELIS, J., BURSÍKOVÁ, P., SUCHÝ, O. 2008. *Laboratorní metody/zařízení pro zkoumání vplyvu prostředí (teploty a obsahu kyslíku) na markanty elektrických zkratu a přechodových odporu u Cu vodičů: dílčí výzkumná zpráva za rok 2007-2008*. Praha: Ministerstvo vnitra České republiky, 2008. 77 s.
- DVOŘÁK, O., ANGELIS, J., BURSÍKOVÁ, P., SUCHÝ, O. 2011b. Zjišťování příčin vzniku požárů a hodnocení nebezpečných účinků požárů na osoby, majetek a životní prostředí: DÚ č. 6 laboratorní metody/zařízení pro zkoumání vplyvu prostředí (teploty a obsahu kyslíku) na markanty elektrických zkratu a přechodových odporu u Cu vodičů. Praha: Ministerstvo vnitra České republiky, 2011. 170 s.

- DVOŘÁK, O., CHARVÁTOVÁ, V., RŮŽIČKA, M. 2007. Nebezpečí toxicity zplodin hoření materiálů. Praha: Ministerstvo vnitra České republiky, 2007. 87 s. ISBN 978-80-86640-92-1.
- DVOŘÁK, O., MICHUT, P., VOŘÍŠEK, K. 2011a. Zjišťování příčin vzniku požárů a hodnocení nebezpečných účinků požárů na osoby, majetek a životní prostředí: DVÚ č. 7 zkušební metody a zařízení pro identifikaci technických závad na vybraných elektrických armaturách a elektrických zařízeních/přístrojích jako příčin vzniku požáru a/nebo následného výbuchu. Praha: Ministerstvo vnitra České republiky, 2011. 103 s.
- DZURENDA, L. 2005. *Spalovanie dreva a kôry*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2005. 124 s. ISBN 80-228-1555-1.
- ECKHOFF, R., K. 2003. Propagation of flames in dusts clouds. In: ECKHOFF, R., K. *Dust explosions in the process industries*. 3. vyd. Houston: Gulf Professional Publishing, 2003, s. 251-384. ISBN: 978-0-7506-7602-1.
- EN 1991-1-2:2002: Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire.
- EN 60 898-1:2003: Electrical accessories. Circuit breakers for overcurrent protection for household and similar installations. Part 1: Circuit-breakers for a.c. operation.
- EN ISO 1716:2010: Reaction to fire tests for products. Determination of the gross heat of combustion (calorific value).
- EN ISO 2592:2001: Determination of flash and fire point. Cleveland open cup method.
- FENGEL, D., WEGENER, G. 1984. *Wood: chemistry ultrastructure reactions*. New York: Walter de Gruyter, 1984. 613 s. ISBN 3110084813.
- FILIPI, B. 2003. *Nauka o materiálu*. Ostrava: SPBI, 2003. 124 s. ISBN 80-86634-11-6.
- FILIPPAKOU, M., P., KARAGIANNOPOULOS, C., G., AGORIS, D., P., BOURKAS, P., D. 2001. Electrical contact overheating under short-circuit currents. In: *Electric power systems research*. ISSN 0378-7796, 2001, roč. 57, č. 2, s. 141-147.
- FORNEY, G., P., MELL, W., E. 2007 *Visualization and modeling of smoke transport over landscape scales*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2007, 17 s.
- FREDLUND, B. 1988. A model for heat and mass transfer in timber structures during fire: a theoretical, numerical and experimental study. Lund: Lund University, 1988.
- FRIQUIN, K., L. 2011. Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. In: *Fire and Materials*. ISSN 0308-0501, 2011, roč. 35, č. 5, s. 303-327.
- FURTON, K., G., MYERS, L., J. 2001. The scientific foundation and efficacy of the use of canines as chemical detectors for explosives. In: *Talanta*. ISSN 0039-9140, 2001, roč. 53, č. 3, s. 487-500.
- GLASSMAN, I. 1989. Soot formation in combustion proces. In: *22nd Symposium on Combustion*. Pittsburg: The Combustion Institute, 1989. s. 295-311.
- GRIECO, E., M., BALDI, G. 2012. Pyrolysis of polyethylene mixed with paper and wood: interaction effects on tar, char and gas yields. In: *Waste Management*. ISSN 0956-053X, 2012, roč. 32, č. 5, s. 833-839.
- GRIFFITHS, L., G., HESELDEN, A., J., M. 1967. *The Use of wooden blocks as simple radiometers*. Borehamwood: Fire Research Station, 1967.
- HARRISON, R., SPEARPOINT, M., J. 2006. *Smoke management issues in buildings with large enclosures*. Melbourne: Fire Australia, 2006.
- HESKESTAD, G. 1995. Fire Plumes. In: DiNenno, P. J. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 2. vyd. Massachusetts: National Fire Protection Association, 1995. s. 2-1–2-17. ISBN 087765-451-4.

- HESKESTAD, G., HAMADA, T. 1993. Ceiling jets of strong fire plumes. In: *Fire Safety Journal*. ISSN 0379-7112, 1993, roč. 21, č. 1, s. 69-82.
- HOLM, C., KALLIONIEMI, P. 1980. *The fire behaviour of load carrying wood structures*. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 1980.
- HONEYWELL. 2008. *IQ8Quad: The right sensor for every environment*. Neuss: Honeywell Company, 2008. 12 s.
- HOWELL, J. R., MENGUC, P., M., SIEGEL, R. 2010. *Thermal radiation heat transfer*. 5. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2010. 987 s. ISBN 978-1439805336.
- CHEN, C., Y. a kol. 2003. SIMS depth profiling analysis of electrical arc residues in fire investigation. In: *Applied Surface Science*. ISSN 0169-4332, roč. 203-204, s. 779-784.
- CHEN, X., D., STOTT, J., B. 1993. The effect of moisture content on the oxidation rate of coal during near-equilibrium during and wetting at 50 °C. In: *Fuel*. ISSN 0016-2361, 1993, roč. 72, č. 6, s. 787-792.
- INCROPERA, F., P., DEWITT, D., P. 1990. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 3. vydanie. Chichester: Wiley, 1990. 919 s. ISBN 9780471612469.
- INŠTRUKCIA MS SR č. 12/2005 č. 19292/2004-53 o organizácii a riadení znaleckej, tlmočnickej a prekladateľskej činnosti a o súčinnosti pri jej kontrole.
- ISMAIL, I., M., K., WALKER, P., L. 1980. Rates and heats of oxygen chemisorption on Saran chars at 100 °C. In: *Journal of Colloid and Interface Science*. ISSN 0021-9797, 1980, roč. 75, č. 1, s. 299-312.
- ISO 871:2006: *Plastics – Determination of ignition temperature using a hot-air furnace*.
- ISO 5657:1997: *Reaction to fire tests: Ignitability of building products using a radiant heat source*.
- ISO 5660-1:2002: *Reaction to fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)*.
- ISO 9705:1993: *Fire tests. Full scale room test for surface products*.
- ISO 80000-1:2009: *Quantities and units. Part 1: General*.
- KAČÍK, F., KAČÍKOVÁ, D. 2014. *Chémia: vysokoškolská učebnica*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2014. 172 s. ISBN 978-80-228-2676-1.
- KAČÍK, F., LAUROVÁ, M. 2008. *Prírodné a syntetické polyméry: vysokoškolská učebnica*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008, 199 s. ISBN 978-80-228-1922-0.
- KAČÍK, F., LAUROVÁ, M., KAČÍKOVÁ, D. 2012. *Analytická chémia: vysokoškolská učebnica*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2012, 295 s. ISBN 978-80-228-2331-9.
- KAČÍKOVÁ, D. 2001. *Všeobecná chémia*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2001. 136 s. ISBN 80-228-1008-8.
- KAČÍKOVÁ, D. 2006. *Vybrané kapitoly z dynamiky požiaru: študijné texty pre voľný ročník študijného programu Hasičské a záchrannárske služby*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2006. 52 s.
- KAČÍKOVÁ, D. a kol. 2007. *Materiály v protipožiarnej ochrane: vybrané kapitoly pre voľný ročník inžinierskeho ŠP Hasičské a záchrannárske služby*. 2. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2007. 125 s. ISBN 978-80-228-1725-7.
- KAČÍKOVÁ, D., NETOPILOVÁ, M., OSVALD, A. 2006. *Drevo a jeho termická degradácia*. Ostrava: SPBI, 2006. 79 s. ISBN 80-86634-78-7.
- KADLEC, Z. 2009. *Průvodce šílením tepla pro požární speciality*. Ostrava: SPBI, 2009. 100 s. ISBN 978-88-0738-5061-6.
- KAJI, R., HISHINUMA, Y., NAKAMURA, Y. 1987. Low temperature oxidation of coals – a calorimetric study. In: *Fuel*. ISSN 0016-2361, 1987, roč. 66, č. 2, s. 154-157.
- KALLIO, E., YAMAUCHI, M., FRILUND, H. 2008. Analysis of the H+ ring velocity distribution function near the Martian and Venusian bow shocks by an analytical model. In: *Planetary*

- and Space Science*. ISSN 0032-0633, 2008, roč. 56, č. 6, s. 818-822.
- KALOUSEK, J. 1999. *Základy fyzikální chemie hoření, výbuchu a hašení*. 2. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 1999. 203 s. ISBN 80-86111-34-2.
- KARLSSON, B., QUINTIERE, J. G. 2000. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton: CRC Press, 2000. 336 s. ISBN 0-8493-1300-7.
- KLOTE, J., H., MILKE, J., A. 1992. *Design of smoke management system*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1992.
- KLOTE, J. H. 1995. Smoke control. In: DiNunno, P. J. *SFPE Handbook of fire protection engineering*. 2. vyd. Massachusetts: National Fire Protection Association, 1995. s. 4-230-4-245. ISBN 0-87765-354-2.
- KLUČKA, J., MÓZER V. 2014. Štatisticko-ekonomické aspekty požiarnej bezpečnosti. Žilina: Žilinská univerzita, 2014. 125 s. ISBN 978-80-554-0964-1.
- KOKKALA, M., A., THOMAS, P., H., KARLSSON, B. 1993. Rate of heat release and ignitability indices for surface linings. In: *Fire and Materials*. ISSN 1099-1018, 1993, roč. 17, č. 5, s. 209-216.
- KOLLER, A., WASHBURN, M., P., LANGE, B. a kol. 2002. Proteomic survey of metabolic pathways in rice. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, roč. 99, č. 18, s. 11969-11974.
- KREVELEN, D., W., SCHUYER, J. 1957. *Coal science*. Amsterdam: Elsevier, 1957. 352 s.
- KUČERA, P., KAISER, R., PAVLÍK, T., POKORNÝ, J. 2008. *Metodický postup při odlišném způsobu splnění technických podmínek požární ochrany*. Ostrava: SPBI, 2008. 201 s. ISBN 978-80-7385-044-9.
- KUČERA, P., KAISER, R., PAVLÍK, T., POKORNÝ, J. 2009. *Požární inženýrství dynamika požáru*. Ostrava: SPBI, 2009. 152 s. ISBN 978-80-7385-074-6.
- KVARČÁK, M. 2005. *Základy požární ochrany*. Ostrava: SPBI, 2005. 134 s. ISBN 80-86634-76-0.
- LAMPLOUGH, F., E., E., MURIEL-HILL, A. 1912. Adsorption of oxygen by coal. In: *Transactions of the Institution of Mining Engineers*, 1912, roč. 45, s. 42
- LAZÁR, M., BLEHA, T., RYCHLÝ, J. 1986. *Chemické reakcie polymérov*. Bratislava: Alfa vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1986. 248 s.
- LADOMERSKÝ, J. 1999. Spaľovne odpadov – vynález skazy?. In: *EnviroMagazín: časopis o tvorbe a ochrane životného prostredia*. ISSN 1335-1877, 1999, roč. 4, č. 6, s. 29-31.
- LAW, M. 1983. A basis for the design of fire protection of building structures. In: *Structural engineer*. ISSN 0733-9445, 1983, roč. 61, č. 1, s. 25-33.
- LEE, E. a kol. 2000. Discrimination between primary and secondary molten marks on electric wires by DAS. In: *Journal of Applied Forensic Science*, 2000, roč. 9, s. 361-379.
- Lougheed, G., C. 2000. Basic principles of smoke management for atriums. In: *Construction Technology Updates*. ISSN 1206-1220, 2000, roč. 47, s. 1-5.
- LOWER AND UPPER EXPLOSIVE LIMITS. 2014. *Lower and Upper Explosive Limits for Flammable Gases and Vapors (LEL/UEL)*. [online]. [cit. 2014-02-07]. Dostupné na internete: <[https://www.mathesongas.com/pdfs/products/Lower-\(LEL\)-&-Upper-\(UEL\)-Explosive-Limits.pdf](https://www.mathesongas.com/pdfs/products/Lower-(LEL)-&-Upper-(UEL)-Explosive-Limits.pdf)>.
- LYMAN, T. 1973. *Metals handbook: atlas of microstructures of industrial alloys*. Cleveland: American Society for Metals, 1973. 346.
- LYON, R. E. 2004. Plastics and rubber. In: Harper, C. A. *Handbook of building materials for fire protection*. New York: McGraw-Hill, 2004. s. 3.1-3.51. ISBN 978-0-07-138891-7.
- MAGUIRE, C. 2004. Fires from causes other than electrical malfunctions. In: Dačić, N., N. *Fire Investigation*, 2004. s. 23-70. ISBN 0-415-24891-4.

- MARTINKA, J. 2012. Analýza vybraných problémov pri posúdení skratu ako príčiny vzniku požiaru. In: *Delta*. ISSN 1337-0863, 2012, roč. 6, č. 11, s. 19-23.
- MARTINKA, J., BALOG, K., CHREBET, T. 2013. Nové trendy posudzovania požiarneho rizika lignocelulóзовých materiálov kónickým kalorimetrom. In: *Advances in Fire and Safety Engineering 2013*. Žilina: Žilinská univerzita, 2013. s. 57-64. ISBN 978-80-88829-80-5.
- MARTINKA, J., HRONCOVÁ, E., CHREBET, T., BALOG, K. 2014d The influence of spruce wood heat treatment on its thermal stability and burning process. In: *European Journal of Wood and Wood Products*. ISSN 0018-3768, 2014, roč. 72, č. 4, s. 477-486.
- MARTINKA, J., HRUŠOVSKÝ, I., CHREBET, T., BALOG, K., SOBOTA, M. 2014a. Assessment of the heat convection impact on the insulation resistance of the PVC cable cyky 3 X 2.5. In: *Techniczne i społeczne aspekty bezpieczeństwa pracy i ergonomii*. Zielona Góra: University of Zielona Góra, 2014, s. 149-158. ISBN 978-83-7842-164-1.
- MARTINKA, J., HRUŠOVSKÝ, I., CHREBET, T., RANTUCH, P. 2014b. Study of selected natural materials ignitability. In: *Advanced Materials Research*. ISSN 1022-6680, 2014, roč. 1001, s. 201-261.
- MARTINKA, J., CHREBET, T., HRONCOVÁ, E., BACIGÁLOVÁ, K. 2014e. Posúdenie vplyvu hustoty tepelného toku na proces horenia polyetylénu. In: *Acta Facultatis Ecologiae*. ISSN 1336-300X, 2014, roč. 28, č. 1, s. 55-62.
- MARTINKA, J., KAČÍKOVÁ, D., RANTUCH, P., BALOG, K. 2014c. Vplyv termickej modifikácie smrekového dreva na teplotu vznietenia rozvíreného drevného prachu. In: *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. ISSN 1336-3824, 2014, roč. 56, č. 1, s. 87-95.
- MADRZYKOWSKI, D., STROUP, D., W. 2008. Flammability hazard of materials. In: Cote, A., E. *Fire protection handbook*. 20. vyd. Massachusetts: National Fire Protection Association, 2008. s. 2-31-2.48. ISBN 978-0-87765-758-3.
- MASAŘÍK, I. 2003. *Plasty a jejich požární nebezpečí*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 2003. 183 s. ISBN 80-86634-16-7.
- MASAŘÍK, I., DVOŘÁK, O., CHARVÁTOVA, V. 1999. *Výzkum toxicity zplodin hoření materiálů: závěrečná zpráva grantového projektu RN 1998 1999 010*. Praha: Technický ústav PO, 1999. 98 s.
- MAZUMDAR, B., K., BENERJEE, A., NANDI, H., C. 1983. Spontaneous combustion of coal – an approach to the problem. In: *Fuel Science and Technology*, 1983, roč. 2, s. 93-108.
- McCAFFREY, B., J., QUINTIERE, J., G., HARKLEROAD, M., F. 1981. Estimating room fire temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations. In: *Fire Technology*. ISSN 0015-2864, 1981, roč. 17, č. 2, s. 98-119.
- MELCER, I. BLAŽEJ, A., ŠUTÝ, L. 1977. *Analytická chémia dreva*. Bratislava: Alfa vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1977. 326 s.
- MERAVÝ, J. 2011. *Elektrotechnická spôsobilosť pre elektrikárov*. 4. vyd. Trenčín: Ján Meravý – Lighting, 2011. 414 s. ISBN 9788096850983.
- MIKKOLA, E. 1990. Charring of wood. In: *Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus*. ISSN 0358-5077, 1990, roč. 689, 36 s.
- MIKKOLA, E. 2009. Ignitability of solid materials. In: Babrasukas, V., Grayson, S., J. *Heat Release in Fires*. London: Interscience Comunicatons, 2009. s. 225-232. ISBN 978-0-9556548-4-8.
- MIKKOLA, E., WICHMAN, I., S. 1989. On the thermal ignition of combustible materials. In *Fire and Materiasl*. ISSN 1099-1018, 1989, roč. 14, č. 3, s. 87-96.
- MITTEROVÁ, I. 2008. Hodnotenie účinnosti rôznych druhov retardérov metódou úbytku na hmotnosti. In: Osvald, A. *Wood and Fire Safety*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. s. 191-202. ISBN 978-80-228-1870-4.

- MLEZIVA, J., ŠŇUPÁREK, J. 2000. *Polymery: výroba, štruktúra, vlastnosti a použitie*. 2. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. 544 s. ISBN 80-85920-72-7.
- MODEST, M. 2013. *Radiative heat transfer*. 3. vyd. Massachusetts: Academic Press, 2013. 904 s. ISBN 9780123869449.
- MOOR, J. W. 1981. *Fyzikálna chémia*. Praha: STNL, 1981.
- MOTEVALLI, V., MARKS, C., H. 1991. Characterizing the unconfined ceiling jet under steady state – state conditions: a reassessment. In: Cox, G., Langford, B. *Fire Safety Science*. New York: Elsevier, 1991. s. 77-91. ISBN 978-1851667192.
- MOWRER, F., W., WILLIAMSSON, R., B. 1987. Estimating room temperatures from fires along walls and in corners. In: *Fire Technology*. ISSN 0015-2864, 1987, roč. 23, č. 2, s. 133-145.
- MURPHY, J. J., SHADDIX, C. R. 2006. Combustion kinetics of coal chars in oxygen-enriched environments. In: *Combustion and Flame*. ISSN 0010-2180, 2006, roč. 144, č. 4, s. 710-729.
- MUSIL, J., KONRÁD, Z., SUCHÁNEK, J. 2001. *Kriminalistika*. Bratislava: C. H. Beck, 2001. 512 s. ISBN 80-7179-362-0.
- MUZYCZUK, J. 1973. *Samozagrzewanie węgla w procesie jego utleniania strumieniem powietrza w warunkach zbliżonych do warunków adiatermicznych*. Katowice: GIC, 1973, 22 s.
- MUZYCZUK, J., KOŁODZIEJCZYK, B. 1985. *Geneza i prewencja pożarów endogenicznych w kopalniach węgla: stowarzyszenie inżynierów i techników górnictwa*. Katowice: Zarząd Oddziału w Katowicach, 1985.
- MV SR. 2010. *Štatistická ročenka*. Bratislava: MV SR, 2010. 62 s.
- MV SR. 2011. *Štatistická ročenka*. Bratislava: MV SR, 2011. 60 s.
- MV SR. 2012. *Štatistická ročenka*. Bratislava: MV SR, 2012. 62 s.
- NARIADENIAMI KOMISIE (ES) Č. 244/2009 z 18. marca 2009, ktorým sa vykonáva smernica Európskeho parlamentu a Rady 2005/32/ES v súvislosti s požiadavkami na ekodizajn nesmerových svetelných zdrojov pre domácnosť.
- NARIADENIAMI KOMISIE (ES) č. 245/2009 z 18. marca 2009, ktorým sa vykonáva smernica Európskeho parlamentu a Rady 2005/32/ES v súvislosti s požiadavkami na ekodizajn žiaroviek bez zabudovaného predradníka, výbojok s vysokou svietivosťou a predradníkov a svetidiel, ktoré sú schopné ovládať takéto svetelné zdroje a ktorým sa ruší smernica Európskeho parlamentu a Rady 2000/55/ES.
- NFPA 53:2011: Recommended practice on materials, equipment, and systems used in oxygen-enriched atmospheres.
- NFPA 68: Standard on explosion protection by deflagration venting.
- NFPA 72:2010: National fire alarm and signaling code.
- NFPA 92B:2000: Guide for smoke management systems in malls, atria, and large areas.
- NFPA 654:2006: Standard for the prevention of fire and dust explosions from the manufacturing, processing, and handling of combustible particulate solids.
- NFPA 921:2014: Guide for fire and explosion investigations (pri práci s textami technických noriem NFPA 921:2014, 2008 a 2004 sa vychádzalo z pôvodného znenia v Anglickom jazyku a rovnako zo znenia v Slovenskom jazyku z prekladov vykonaných Požiarnotechnickým a expertíznym ústavom MV SR v Bratislave).
- NFPA 921:2008: Guide for fire and explosion investigations.
- NFPA 921:2004: Guide for fire and explosion investigations.
- NARIADENIE VLÁDY SR č. 355/2006 Z. z. z 10. mája 2006 o ochrane zamestnancov pred rizikami súvisiacimi s expozíciou chemickým faktorom pri práci, v znení platných právnych predpisov.
- OKAMOTO, K. 2012. Evaporation and diffusion behavior of fuel mixtures of gasoline and kerosene. In: *Fire Safety Journal*. ISSN 0379-7112, 2012, roč. 49, č. 4, s. 47-61.

- ORLÍKOVÁ, K., ŠTROCH, P. 1999. *Chemie procesů hoření*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 1999. 87 s. ISBN 80-86111-39-3.
- OSTMAN, B. 2009. Smoke and soot. In: Babrauskas, V., Grayson, S., J. *Heat Release in Fires*. 2. vyd. London: Interscience Communications, 2009. s. 233-250. ISBN 978-0-9556548-4-8.
- OSVALD, A. 1997. *Požiarotechnické vlastnosti dreva a materiálov na báze dreva: vedecké štúdie 8/97/A*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1997. 52 s. ISBN 80-228-0656-0.
- OSVALDOVA, M., L., OSVALD, A. 2013. *Flame retardation of wood*. In: Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680, 2013, roč. 690-693, s. 1331-1334.
- OSVALD, A., KRAJČOVIČOVÁ, J., MITTEROVÁ, I., ORÉMUSOVÁ E. 2009. *Hodnotenie materiálov a konštrukcií pre potreby protipožiarnej ochrany*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. 355 s. ISBN 978-80-228-2039-4.
- OTTMAR, R., D., PETERSON, J., L., LEENHOUTS, B., CORE, J., E. 2001. Smoke management: techniques to reduce or redistribute emissions. In: Hardy, C., C. *Smoke Management Guide 8.0*. Lawton: National Wildfire Coordination Group, 2001, s. 51-60.
- PHILLIPS, D., SINCLAIR, R., DAVIES, R., W. 2000. *Containing smoke in atria*. London: RWDI, 2000, 22 s.
- PONEC, V., KNOR, Z., ČERNÝ, S. 1968. *Adsorpce na tuhých látkách*. Praha: STNL, 1968, 77 s.
- KUBALA J., POLÁK, P. 2010. *Repetitóriium kriminalistiky*. Bratislava: Iura Edition, 2010. 210 s. ISBN 978-80-8078-351-8.
- PERT, A., D., BARON, M., G., BIRKETT, J., W. 2006. Review of analytical techniques for arson residues. In: *Journal of Forensic Sciences*. ISSN 1556-4029. 2006, roč. 51, č. 5, s. 1033-1049.
- POKYN PREZIDENTA HAZZ č. 25/2005 ktorým sa mení pokyn prezidenta HaZZ č. 60/2002 o zisťovaní príčin vzniku požiarov, spracúvaní dokumentácie o požiaroch a o štatistickom sledovaní a rozboroch požiarovosti.
- POKYN PREZIDENTA HAZZ č. 60/2002 o zisťovaní príčin vzniku požiarov, spracúvaní dokumentácie o požiaroch a o štatistickom sledovaní a rozboroch požiarovosti.
- POLYKRATI, A., D., KARAGIANNPOULOS, C. G., BOURKAS, P. D. 2004. Thermal effect on electric power network components under short-circuit currents. In: *Electric power systems research*. ISSN 0378-7796, 2004, roč. 72, č. 3, s. 261-267.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. 1997. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997. 488 s. ISBN 80-07-00960-4.
- PTÁČEK, L., a kol. 1999. *Náuka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
- RAAB, M. 1999. *Materiály a člověk: netradiční úvod do současné materiálové vědy*. Praha: Encyklopedický dům, 1999. 227 s. ISBN 80-86044-13-0.
- ROCKWELL S., R., RANGWALA, A. S. 2013. Modeling of dust air flames. In: *Fire Safety Journal*. ISSN 0379-7112, roč. 59, č. 1, s. 22-29.
- ROHSENOW, W., HARTNETT, J., CHOY. 1998. *Handbook of heat transfer*. 3. vyd. Columbus: McGraw-Hill, 1998. 1344 s. ISBN 978-0070535558.
- SAITOH, N., TAKEUCHI, S. 2005. Fluorescence imaging of petroleum accelerants by time-resolved spectroscopy with pulsed Nd-YAG laser. In: *Forensic Science International*. ISSN 0379-0738, roč. 163, č. 1-2, s. 38-50.
- SARANČUK, V., I. 1982. *Okislenie i samovozgoranie uglia*. Kijev: Naukova Dumka, 1982. 155 s.
- SARANČUK, V., I. a kol. 1994. *Okislenie i samovozgoranie tverdogo topoliva*. Kijev: Naukova Dumka, 1994, 120 s. ISBN 5-12-003993-6.
- SCUDAMORE, M., J., BRIGGS, P., J., PRAGER, F. H. 1991. Cone calorimetry: a review of tests carried out on plastics for the association of plastics manufacturers in Europe. In: *Fire and Materials*. ISSN 1099-1018, 1991, roč. 15, č. 2, s. 65-84.

- SETNÍČKA, F. 1981. *Energetika a tepelná technika pre drevárskych inžinierov*. Bratislava: ALFA Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1981. 432 s.
- SEVENSTER, P., G. 1961. Studies on the interaction of oxygen with coal in the temperature range 0 to 90 °C. Part I. In: *Fuel*. ISSN 0016-2361, 1961, roč. 40, s. 7-18.
- SHI, L., CHEW, M., I., L. 2013. Experimental study of woods under external heat flux by autoignition. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. ISSN 1388-6150, roč. 111, č. 2, s. 357-372.
- SCHARTEL, B., PAWLOWSKI, K. H., LYON, R. E. 2007. Pyrolysis combustion flow calorimeter: a tool to assess flame retarded PC/ABS materials. In: *Thermochimica Acta*. ISSN 0040-6031, 2007, roč. 462, č. 1-2, s. 1-14.
- ŠIMON, P. 2004. Isconversional methods: Fundamentals, meaning and applications. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, ISSN 1388-6150, 2004, vol. 76, č. 1, s. 123-132.
- ŠIMON, P. 2006. Induction periods: theory and applications. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, ISSN 1388-6150, 2006, vol. 84, č. 1, s. 263-270.
- SKOČOVSKÝ, P. 1998. *Materiály a technológia 2*. Banská Bystrica: Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici, 1998. 83 s. ISBN 80-8055-139-1.
- SLOVNAFT. 2012. A100000. Bratislava: Slovnaft, 2012, 1 s.
- SMEDT, G., CORTE, F., NOTELE, R., BERGHMANS, J. 1999. Comparison of two standard test methods for determining explosion limits of gases at atmospheric conditions. In: *Journal of Hazardous Materials*. ISSN 0304-3894, 1999, roč. 70, č. 3, s. 105-113.
- SOLÁR, R. 2001. *Chémia dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2001. 101 s. ISBN 80-228-1007-X.
- SONREAL, E., A., ELLMANN, R., C. 1974. *Laboratory determination of factors affecting storage of North Dakota Lignite*. Washington: US Bureau of Mines, 1974.
- STAUFFER, E., DOLAN, J., A., NEWMAN R. 2007. *Fire Debris Analysis*. Massachusetts: Academic Press, 2007. 672 s. ISBN 978-0126639711.
- STN 64 0001:1995: Plastikárske a gumárske názvoslovie.
- STN EN 13501-1+A1:2010: Klasifikácia požiarých charakteristík stavebných výrobkov a prvkov stavieb. Časť 1: Klasifikácia využívajúca údaje zo skúšok reakcie na oheň.
- STN EN 13501-6:2015: Klasifikácia požiarých charakteristík stavebných výrobkov a prvkov stavieb. Časť 6: Klasifikácia využívajúca údaje zo skúšok reakcie elektrických káblov na oheň.
- STN EN 50281-2-1: Elektrické zariadenia do priestorov s horľavým prachom. Časť 2-1: Skúšobné metódy. Metódy na stanovenie minimálnych teplôt vznietenia prachu.
- STROUD, C. B., TSANG, W., MANZELLO, S. L. 2007. Detailed modeling and analysis of aromatic additive effects in ethylene-air flames. In: *Proceeding of 5th US Combustion Meeting*. San Diego: Western States Section of the Combustion Institute, 2007. s. 49-59. ISBN 9781604238112.
- SVOBODA, L., a kol. 2005. *Stavebné materiály*. Bratislava: Jaga group, 2005. 470 s. ISBN 80-8076-014-4.
- ŠČÍPA, M. 2012. *Overenie funkčnosti hlásiča elektrickej požiarnej signalizácie v závislosti od zdroja horenia: diplomová práca*. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave Materiálo-technická fakulta so sídlom v Trnave, 2012. 66 s.
- ŠENOVSKÝ, M. a kol. 2004. *Základy požárneho inžinýrství*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inžinýrství v Ostravě, 2004. 178 s. ISBN 80-86634-50-7.
- TARABA, B. 1990. Reversible and irreversible interaction of oxygen with coal using pulse flow calorimetry. In: *Fuel*. ISSN 0016-2361, 1990, roč. 69, č. 9, s. 1191-1199.
- TARABA, B. 2003. *Nízkotepelná oxidace a samovznícování uhelné hmoty*. Ostrava: Ostravská univerzita, 2003. 112 s. ISBN 80-7042-832-5.

- TARABA, B., BEHÚLOVÁ, M., KRAVÁRIKOVÁ, M. 2004. *Mechanika tekutín termomechanika*. 2. vyd. Bratislava: STU v Bratislave, 2004. 241 s. ISBN 80-227-2041-0.
- TARABA, B., BEHÚLOVÁ, M., KRAVÁRIKOVÁ, M. 2007. *Mechanika tekutín termomechanika: zberka príkladov*. Trnava: STU v Bratislave – MTF so sídlom v Trnave, 2007. 242 s. ISBN 978-80-8096-021-6.
- TARABA, B., ČÁP, K. 1985. *Teplný efekt reakce uhelné hmoty se vzdušným kyslíkem s ohledem na objasnění úlohy oxidačních procesů při utváření důlního mikroklimatu*. Ostrava: HOÚ ČSAV, 1985.
- TARABA, B., ČÁP, K. 1986. *Vývin tepla při nízkoteplotní oxidaci uhelné hmoty*. Příbram: ÚGG ČSAV, 1986.
- TARABA, B., DOBAL, V., ČÁP, K., HARAŠTA, M. 1988. *Differentiation of thermal effects during low temperature oxidation of coal*. In: *Fuel*. ISSN 0016-2361, 1988, roč. 67, č. 6, s. 758-763.
- TAYLOR, C., M., ROSENHAN, A., K., RAINES, J., M., RODRIGUEZ, J., M. 2012. An arson investigation by using comprehensive two-dimensional gas chromatography-quadrupole mass spectrometry. In: *Journal of Forensic Research*. ISSN 2157-7145, 2012, roč. 3, č. 9, s. 1-8. doi:10.4172/2157-7145.1000169.
- TEWARSON, A. 1995. Generation of heat and chemical compounds in fire. In: DiNenno, P. J. *SFPE Handbook of fire protection engineering*. 2. vyd. Massachusetts: National Fire Protection Association, 1995. s. 3-82-3-161. ISBN 0-87765-354-2.
- TROITZSCH, J. 1982. *Brandverhalten von Kunststoffen*. Wien: Carl Hanser Verlag München, 1982. 590 s. ISBN 3-446-13391-7.
- TUREKOVÁ, I., BALOG, K. 2001. Parametre vznictlivosti polyetylénu a aktivačná energia iniciácie procesu horenia. In: *Vedecké práce Materiálovotechnologickej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2001, roč. 11, s. 181-186. ISBN 80-227-1648-0.
- UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE. 2004. *Základní praktika z analytické chemie*. Praha: Univerzita Karlova v Praze, 2004. 45 s.
- VARGAFTIK, N., B., VINOGRADOV, Y., K., YARGAN, V., S. 1996. *Handbook of physical properties of liquids and gases*. Ney York: Begell House, 1996, s. 1370. ISBN 1-56700-063-0.
- VESELÝ, K. 1992. *Polymery: struktura, syntézy, vlastnosti, zpracování*. Brno: ČSPCH, 1992. 178 s.
- VOHLÍDAL, J., JULÁK, A., ŠTULÍK, K. 1999. *Chemické a analytické tabulky*. Praha: Grada Publishing, 1999. 652 s. ISBN 978-80-7169-855-5.
- VOJTĚCH, D. 2007. *Analýza vzorků elektrických zkratů na měděných vodičích*. Praha: Technický ústav požární ochrany, 2007. 110 s.
- VYHLÁŠKA. MPSVaR Č. 508/2009 Z. z., ktorou sa ustanovujú podrobnosti na zaistenie bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci s technickými zariadeniami tlakovými, zdvíhacími, elektrickými a plynovými a ktorou sa ustanovujú technické zariadenia, ktoré sa považujú za vyhradené technické zariadenia.
- VYHLÁŠKA MS SR č. 490/2004 Z. z. ktorou sa vykonáva zákon č. 382/2004 Z. z. o znalcoch, tlmočníkoch a prekladateľoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení platných právnych predpisov.
- VYHLÁŠKA MV SR č. 96/2004 Z.z., ktorou sa ustanovujú zásady protipožiarnej bezpečnosti pri manipulácii a skladovaní horľavých kvapalín, ťažkých vykurovacích olejov a rastlinných a živočíšnych tukov a olejov.
- VYHLÁŠKA MV SR č. 121/2002 Z. z. o požiarnej prevencii v znení platných právnych predpisov.
- VYHLÁŠKA MV SR č. 124/2000 Z.z., ktorou sa ustanovujú zásady požiarnej bezpečnosti pri činnostiach s horľavými plynmi a horenie podporujúcimi plynmi.
- VYHLÁŠKA MV SR č. 258/2007 Z.z. o požiadavkách na protipožiarnu bezpečnosť pri skladovaní, ukladaní a pri manipulácii s tuhými horľavými látkami.

- VYHLÁŠKA MV SR č. 401/2007 Z.z. o technických podmienkach a požiadavkách na protipožiarnu bezpečnosť pri inštalácii a prevádzkovaní palivového spotrebiča, elektrotepelného spotrebiča a zariadenia ústredného vykurovania a pri výstavbe a používaní komína a dymovodu a o lehotách ich čistenia a vykonávania kontrol.
- VYHLÁŠKA MV SR č. 634/2005 Z. z. ktorou sa vykonávajú niektoré ustanovenia zákona č. 473/2005 Z. z. o poskytovaní služieb súkromnej bezpečnosti a o zmene a doplnení niektorých zákonov (zákon o súkromnej bezpečnosti) v znení platných právnych predpisov.
- WALTON, W., D., THOMAS, P., H. 2002. Estimating temperatures in compartment fires. In: DiNunno, P. J. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3. vyd. Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002. s. 3-171 – 3-188. ISBN 087765-451-4.
- WANG, B., FANG, A., HEIM, J., BOGDANOV, B., PUGH, S., LIBARDONI, M., ZHANG, X. 2010. DISCO: distance and spectrum correlation optimization alignment for two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry-based metabolomics. *Analytical Chemistry*. ISSN 0003-2700, 2010, roč. 82, s. 5069-5081.
- WANG, F., HE, Y., LI, P., CHEN, X., ZHOU, D., WANG, J. 2014. Experimental and theoretical study of the ignition of timber by an incandescent lamp. In: *Journal of Fire Sciences*. ISSN 0734-9041, 2014, roč. 32, č. 2, s. 165-178.
- WEIR, J., R., CARLSON, J., D. 2007. *Smoke management for prescribed burning*. Oklahoma City: Oklahoma Cooperative Extension Service Division of Agricultural Sciences and Natural Resources Oklahoma State University, 2007. 18 s.
- WHITE, R., H., SCHAFFER, E. 1981. Transient moisture gradient in fire-exposed wood slab. In: *Wood and Fiber Science*. ISSN 0735-6161, 1981, roč. 13, s. 17-38.
- WICHTERLOVÁ, J. 2001. *Chemie nebezpečných anorganických látok*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2001. 63 s. ISBN 80-86111-92-X.
- WINMILL, T., F. 1914. Adsorption of oxygen by coal. In: *Transactions of the Institution of Mining Engineers*, 1914, roč. 48, s. 508.
- XU, Q., MAJLINGOVA, A., ZACHAR, M., JIN, C., JIANG, Y. 2012. Correlation analysis of cone calorimetry test data assessment of the procedure with tests of different polymers. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. ISSN 1388-6150, 2012, roč. 110, č. 1, s. 65-70.
- YU, H., Z., FEATH, G., M. 1979. Ceiling heat transfer during fire plume and fire impingement. In: *Fire and Materials*. ISSN 1099-1018, 1979, roč. 3, č. 3, s. 140-147.
- ZABETAKIS, M., G., BURGESS, D., S. 1961. *Research on hazards associated with the production and handling of liquid hydrogen*. Washington: Bureau of Mines, 1961. 132 s.
- ZÁKON č. 300/2005 Z. z. Trestný zákon v znení platných právnych predpisov.
- ZÁKON č. 301/2005 Z. z. Trestný poriadok v znení platných právnych predpisov.
- ZÁKON č. 314/2001 Z. z. o ochrane pred požiarmi v znení platných právnych predpisov.
- ZÁKON č. 372/1990 Zb. o priestupkoch v znení platných právnych predpisov.
- ZÁKON č. 382/2004 Z. z. o znalcoch, tlmočníkoch a prekladateľoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení platných právnych predpisov.
- ZÁKON č. 460/1992 Zb. Ústava Slovenskej republiky v znení platných právnych predpisov.
- ZÁKON č. 473/2005 Z. z. o poskytovaní služieb v oblasti súkromnej bezpečnosti a o zmene a doplnení niektorých zákonov (zákon o súkromnej bezpečnosti) v znení platných právnych predpisov.
- ZELENÝ, J., SLOSIARIK, J. 2000. *Manažérstvo rizika*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2000. 374 s. ISBN 80-228-0892-X.

Odkazy na internetové zdroje:

- DRYSDALE, D. 1999. [cit. 2015/07/07]. Dostupné na internete: <<http://www.ilocis.org/documents/>>.
- CHEM. 2015. *The dynamic chemistry hypertext*. [cit. 2015/07/07]. Dostupné na internete: <<http://chemwiki.ucdavis.edu>>.
- CHEMISTRYSCIENCES. 2015. *The research*. [cit. 2015/07/07]. Dostupné na internete: <<http://www.und.edu/dept/chromatography/documents/Chromatography.pdf>>.
- MINIATURE CIRCUIT BREAKER. 2013. MCB: model - PR 124 C 125. [cit. 2015/07/07]. Dostupné na internete: <<https://steelsparrow.com/miniature-circuit-breaker-mcb-model-pr-124-c-125-teknic-brand-4-pole-125-amps-230-400-240-415volts-ordering-code-0099292-tripping-characteristics-c-according-to-iec-en-60-898-1.html>>.
- NIST. 2012. *NIST multizone modeling website*. [cit. 2015/07/07]. Dostupné na internete: <<http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/index.htm>>.
- RWDI. 2015. *Rwdi*. [cit. 2015/07/07]. Dostupné na internete: <<http://www.rwdi.com/asp/pub/misc/smokecontrolsmokemanagementconsulting.aspx>>.
- SMOKE MANAGEMENT. 2006. Smoke management. [cit. 2015/07/07]. Dostupné na internete: <<http://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/10092/117/3/Smoke%20management%20issues%20in%20buildings%20with%20large%20enclosed%20spaces.pdf>>.
- STUDY. 2015. *Study: air pollution kills two million people per year*. [cit. 2015/07/07]. Dostupné na internete: <<http://www.examiner.com/article/study-air-pollution-kills-two-million-people-per-year>>.
- SIGMA-ALDRICH. 2012. *Select*. [cit. 2015/07/07]. Dostupné na internete: <www.sigmaaldrich.com>.
- USDA. 2015. *USDA Forest Service Southern Research Station*. [cit. 2015/07/07]. Dostupné na internete: <<http://www.srs.fs.usda.gov/smoke/plumebehavior.htm>>.
- WEIR. 2007. *Smoke management*. [cit. 2015/07/07]. Dostupné na internete: <<http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-5672/E-1008%20Smoke%20Management.pdf>>.

Prílohy

Príloha A Listy od Prof. Ing. Antona Osvalda, PhD., Prof. RNDr. Danice Kačíkovej, PhD. a Prof. Ing. Maroša Soldána, PhD. odporúčajúce predloženú publikáciu, ako vysokoškolskú učebnicu pre vybrané študijné programy na Fakulte bezpečnostného inžinierstva Žilinskej univerzity v Žiline, Drevárskej fakulte Technickej univerzity vo Zvolene a Materiálovotechnologickej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.



Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta bezpečnostného inžinierstva
Katedra požiarneho inžinierstva
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina



Vážený pán
prof. Ing. Karol Balog, PhD.
Ústav bezpečnosti, environmentu a kvality
MTF STU
Pavilón TL
Botanická 9
917 04 Trnava

Odporúčam publikáciu „Balog, K., Kačíková, D., Martinka, J. 2015. *Zisťovanie príčin vzniku požiarov*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2015“, ako vysokoškolskú učebnicu pre poslucháčov vo všetkých troch stupňoch študijného programu Záchranne služby v študijnom odbore 8.3.6 Záchranne služby na Fakulte bezpečnostného inžinierstva Žilinskej univerzity v Žiline.


prof. Ing. Anton Osvald, CSc.
Katedra požiarneho inžinierstva
FBI ŽU v Žiline



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE
ÚSTAV BEZPEČNOSTI, ENVIRONMENTU A KVALITY

Prof. Ing. Maroš Soldán, PhD.
Materiálovotechnologická fakulta STU
Ústav bezpečnosti, environmentu a kvality
Paulínska 16
917 24 Trnava

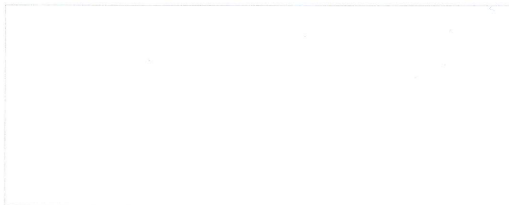
Odporúčam publikáciu „Balog, K., Kačíková, D., Martinka, J. 2015. *Zisťovanie príčin vzniku požiarov*. Zvolene: Technická univerzita vo Zvolene, 2015“, ako vysokoškolskú učebnicu pre poslucháčov vo všetkých troch stupňoch študijného programu Integrovaná bezpečnosť v študijnom odbore 8.3.5 Bezpečnosť a ochrana zdravia pri práci na Materiálovotechnologickej fakulte Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Prof. Ing. Maroš Soldán, PhD.
garant študijného programu Integrovaná bezpečnosť

Slovenská technická univerzita
Materiálovotechnologická fakulta
so sídlom v Trnave
917 24 Trnava, Paulínska 16
- 52 -
Ústav bezpečnosti,
environmentu a kvality

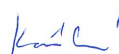


miesto, dňa: 30. 10. 2015
vybavuje: Kačíková
tel. / fax: 045 5206 829
e-mail: kacikova@tuzvo.sk
vaša značka:
naša značka:



Vec: Odporúčanie používania vysokoškolská učebnica

Odporúčam publikáciu „Balog, K., Kačíková, D., Martinka, J. 2015. *Zisťovanie príčin vzniku požiarov*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene“, ako vysokoškolskú učebnicu pre študentov vo všetkých troch stupňoch študijných programov Protipožiarna ochrana a bezpečnosť v študijnom odbore 8.3.6 Záchranné služby na Drevárskej fakulte Technickej univerzity vo Zvolene.



prof. RNDr. Danica Kačíková, PhD.
garant študijných programov I. a II. stupňa POB,
spolugarant študijného programu III. stupňa POB

Príloha B Hodnoty koreňov β_i a konštánt A_i pre dosku

B_i [-]	β_1 [rad]	β_2 [rad]	β_3 [rad]	A_1	A_2	A_3
0	0,0000	3,1416	6,2832	1,0000	-0,0000	0,0000
0,001	0,0316	3,1419	6,2833	1,0002	-0,0002	0,0000
0,002	0,0447	3,1422	6,2835	1,0004	-0,0004	0,0001
0,004	0,0632	3,1429	6,2838	1,0008	-0,0008	0,0002
0,006	0,0774	3,1435	6,2841	1,0012	-0,0012	0,0003
0,008	0,0893	3,1441	6,2845	1,0015	-0,0016	0,0004
0,01	0,0998	3,1448	6,2848	1,0020	-0,0020	0,0005
0,02	0,1410	3,1479	6,2864	1,0030	-0,0040	0,0010
0,04	0,1987	3,1543	6,2895	1,0065	-0,0080	0,0020
0,06	0,2425	3,1606	6,2927	1,0099	-0,0119	0,0030
0,08	0,2791	3,1668	6,2959	1,0130	-0,0158	0,0040
0,1	0,3111	3,1731	6,2991	1,0159	-0,0197	0,0050
0,2	0,4328	3,2039	6,3148	1,0312	-0,0381	0,0100
0,3	0,5218	3,2341	6,3305	1,0450	-0,0555	0,0148
0,4	0,5932	3,2636	6,3461	1,0581	-0,0719	0,0196
0,5	0,6533	3,2923	6,3616	1,0701	-0,0873	0,0243
0,6	0,7051	3,3204	6,3770	1,0813	-0,1025	0,0289
0,7	0,7506	3,3477	6,3923	1,0918	-0,1154	0,0335
0,8	0,7910	3,3744	6,4074	1,1016	-0,1282	0,0379
0,9	0,8274	3,4003	6,4224	1,1107	-0,1403	0,0423
1,0	0,8603	3,4256	6,4373	1,1192	-0,1517	0,0466
1,5	0,9882	3,5422	6,5097	1,1537	-0,2013	0,0667
2,0	1,0769	3,6436	6,5783	1,1784	-0,2367	0,0848
3,0	1,1925	3,8088	6,7040	1,2102	-0,2881	0,1154
4,0	1,2646	3,9352	6,8140	1,2287	-0,3215	0,1396
5,0	1,3138	4,0336	6,9096	1,2403	-0,3442	0,1588
6,0	1,3496	4,1116	6,9924	1,2478	-0,3604	0,1740
7,0	1,3766	4,1746	7,0640	1,2532	-0,3722	0,1861
8,0	1,3978	4,2264	7,1263	1,2569	-0,3812	0,1959
9,0	1,4149	4,2694	7,1806	1,2598	-0,3880	0,2039
10,0	1,4289	4,3058	7,2281	1,2612	-0,3934	0,2104
15,0	1,4729	4,4255	7,3959	1,2677	-0,4084	0,2320
20,0	1,4961	4,4915	7,4954	1,2699	-0,4147	0,2394
30,0	1,5202	4,5615	7,6057	1,2717	-0,4198	0,2472
40,0	1,5325	4,5979	7,6647	1,2723	-0,4217	0,2502
50,0	1,5400	4,6202	7,7012	1,2727	-0,4227	0,2517
60,0	1,5451	4,6353	7,7259	1,2728	-0,4232	0,2526
80,0	1,5514	4,6543	7,7573	1,2730	-0,4237	0,2535
100,0	1,5552	4,6658	7,7764	1,2731	-0,4239	0,2539
∞	1,5708	4,7124	7,8540	1,2732	-0,4244	0,2546

Prameň: Taraba a kol. (2007)

Príloha C Gaussova chybová funkcia

z	$erf z$	$erfc z$
0,00	0,000000	1,000000
0,05	0,056372	0,943628
0,10	0,112463	0,887537
0,15	0,167996	0,832004
0,20	0,222703	0,777297
0,25	0,276325	0,723674
0,30	0,328627	0,671373
0,35	0,379382	0,620618
0,40	0,428392	0,571608
0,45	0,475482	0,524518
0,50	0,520500	0,479500
0,55	0,563323	0,436677
0,60	0,603856	0,396144
0,65	0,642029	0,357971
0,70	0,677801	0,322199
0,75	0,711156	0,288844
0,80	0,742101	0,257899
0,85	0,770668	0,229332
0,90	0,796908	0,203092
0,95	0,820891	0,179109
1,00	0,842701	0,157299
1,10	0,880205	0,119795
1,20	0,910314	0,089686
1,30	0,934008	0,065992
1,40	0,952285	0,047715
1,50	0,966105	0,033895
1,60	0,976348	0,023652
1,70	0,983790	0,016210
1,80	0,989091	0,010909
1,90	0,992790	0,007210
2,00	0,995322	0,004678
2,10	0,997021	0,002979
2,20	0,998137	0,001863
2,30	0,998857	0,001143
2,40	0,999311	0,000689
2,50	0,999593	0,000407
2,60	0,999764	0,000236
2,70	0,999866	0,000134
2,80	0,999925	0,000075
2,90	0,999959	0,000041
3,00	0,999978	0,000022
3,10	0,999988	0,000012

$$erf z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx$$

$$erfc z = 1 - erf z$$

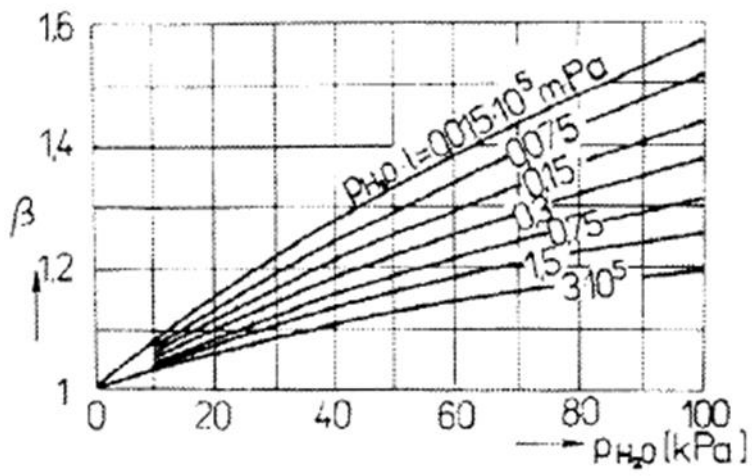
Prameň: Taraba a kol. (2007)

Príloha D Termofyzikálne vlastnosti vzduchu

ϑ [°C]	ρ [kg.m ⁻³]	c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	$\lambda.10^2$ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	$\alpha.10^6$ [m ² .s ⁻¹]	$\eta.10^5$ [N.s.m ⁻²]	$\nu.10^6$ [m ² .s ⁻¹]	Pr [-]
-150	2,7930	1026	0,0120	4,190	0,870	3,110	0,744
-100	1,9800	1009	0,0165	8,280	1,180	5,960	0,722
-50	1,5840	1013	2,0330	12,70	1,461	9,230	0,728
-40	1,5150	1013	2,1140	13,80	1,520	10,04	0,728
-30	1,4530	1013	2,1960	14,90	1,569	10,80	0,723
-20	1,3950	1009	2,2770	16,20	1,618	12,79	0,716
-10	1,3420	1009	2,3590	17,40	1,667	12,43	0,712
0	1,2930	1004	2,4400	18,80	1,716	13,28	0,707
10	1,2470	1004	2,5090	20,00	1,765	14,16	0,705
20	1,2050	1004	2,5910	21,40	1,815	15,06	0,703
30	1,1650	1004	2,6720	22,90	1,864	16,00	0,701
40	1,1280	1004	2,7530	24,30	1,913	16,96	0,699
50	1,0930	1004	2,8230	25,70	1,962	17,95	0,698
60	1,0600	1004	2,8930	27,20	2,011	18,97	0,696
70	1,0290	1009	2,9630	28,60	2,060	20,02	0,694
80	1,0000	1009	3,0440	30,20	2,109	21,09	0,692
90	0,9720	1009	3,1250	31,90	2,148	22,10	0,690
100	0,9460	1009	3,2070	33,60	2,187	23,13	0,688
120	0,8980	1009	3,3350	36,80	2,285	25,45	0,686
140	0,8540	1013	3,4860	40,30	2,374	27,80	0,684
160	0,8150	1017	3,6370	43,90	2,452	30,09	0,682
180	0,7790	1021	3,7760	47,50	2,530	32,49	0,681
200	0,7460	1025	3,9270	51,40	2,599	34,85	0,680
250	0,6740	1038	3,2640	61,00	2,737	40,61	0,677
300	0,6150	1046	4,6010	71,60	2,972	48,33	0,674
350	0,5660	1059	4,9030	81,90	3,139	55,46	0,676
400	0,5240	1067	5,2050	93,10	3,306	63,09	0,678
450	0,4875	1080	5,4300	103,1	3,431	70,54	0,682
500	0,4560	1092	5,4000	115,3	3,619	80,04	0,687
600	0,4040	1113	6,2170	138,3	3,914	96,89	0,699
700	0,3620	1134	6,7040	163,4	4,179	115,4	0,706
800	0,3290	1155	7,1690	188,8	4,434	134,8	0,713
900	0,3010	1172	7,6220	216,2	4,669	155,1	0,717
1000	0,2770	1184	8,0640	245,9	4,905	177,1	0,719

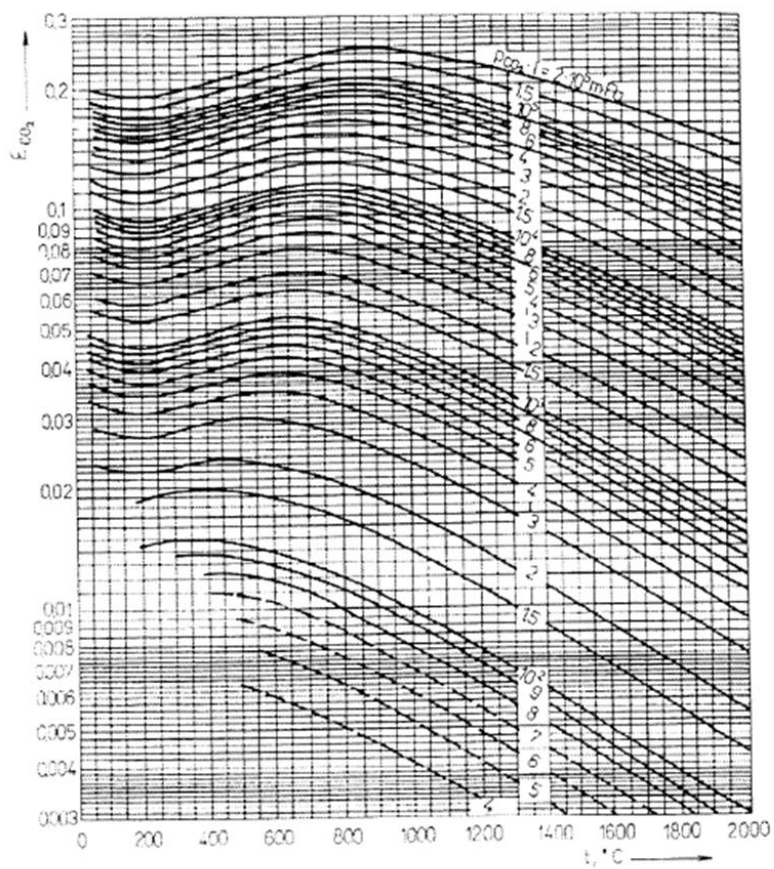
Príklad odčítania: pri teplote 20 °C je $\lambda.10^2 = 2,591 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, teda $\lambda = 2,591.10^{-2} \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Prameň: Taraba a kol. (2007)

Príloha E Korekčný koeficient pre žiarenie vodnej pary β 

Prameň: Kadlec (2009)

Príloha F Závislosť emisivity CO_2 od teploty a súčiny parciálneho tlaku a účinnej hrúbky žiariacej vrstvy



Prameň: Kadlec (2009)

Príloha H Slovensko – Anglicko – Nemecký slovník odborných výrazov

Slovensky	Anglicky	Nemecky
Akcelerátor požiaru	Accelerant	Feuer Accelerator
Analýza požiaru	Fire Analysis	Feueranalyse
Analýza zlyhania	Failure Analysis	Schadensanalyse
Bezprostredná príčina	Proximate Cause	direkte/unmittelbare Ursache
Bod vzplanutia kvapaliny	Flash Point of a Liquid	Flammpunkt einer Flüssigkeit
Čas iniciácie	Ignition Time	Zündzeitpunkt
Časová os	Time Line	Zeitlinie
Deduktívne uvažovanie	Deductive Reasoning	Schlussfolgerndes Denken
Deflagrácia	Deflagration	Deflagration
Detonácia	Detonation	Detonation
Difúzny plameň	Diffusion Flame	Diffusionsflamme
Dym	Smoke	Rauch
Dynamika požiaru	Fire Dynamics	Branddynamik
Efektívne teploty pri požiaru	Effective Fire Temperatures	Effektive Brandtemperaturen
Elektrická iskra	Electric Spark	Elektrischen Funken
Elektrický skrat	Short Circuit	Elektrischer Kurzschluss
Energia vznietenia	Ignition Energy	Zündenergie
Explózia	Explosion	Explosion
Explozívne horenie dymu	Smoke explosion	Rauchexplosion
Forezná veda	Forensic Science	Forensik
Horľavá kvapalina	Combustible Liquid	Brennbare Flüssigkeit
Horľavá kvapalina	Flammable Liquid	Entzündliche Flüssigkeit
Horľavý	Combustible, Flammable	Brennbar
Hustota	Density	Dichte
Chromatografická analýza	Chromatographic Analysis	Chromatographische Analyse
Induktívne uvažovanie	Inductive Reasoning	Induktiven Denken
Kritická hustota tepelného toku	Critical Heat Flux Density	Kritische Wärmestromdichte
Medza horľavosti	Flammable Limit	Flammgrenze
Miesto činu	Scene	Tatort
Miesto výbuchu	Seat of Explosion	Explosionsort
Miesto vzniku	Area of Origin	Entstehungsort
Nadprúd	Overcurrent	Überstrom
Nedostatok kyslíka	Oxygen Deficiency	Sauerstoffmangel
Nehorľavý materiál	Noncombustible Material	Nichtbrennbaren Stoff
Oblúk	Arc	Lichtbogen
Odkvapkávanie	Drop Down	Drip
Okolité	Ambient	Umgebende
Opätovné vzplanutie	Rekindle	Wiederaufleben
Palivo (horľavá látka)	Fuel	Kraftstoff
Plameň	Flame	Flamme
Plynné palivo	Fuel Gas	Brenngas
Požiar	Fire	Feuer
Požiar riadený odvetraním	Ventilation-Controlled Fire	Belüftung-Kontrollierte Feuer
Požiar riadený palivom	Fuel Controlled Fire	Kraftstoff- Kontrollierte Feuer

Požiarne veda	Fire Science	Feuer-Wissenschaft
Požiarne riziko	Fire Risk	Feuergefahr
Požiarne zataženie	Fuel Load	Brandlast
Presné miesto vzniku	Point of Origin	Ausgangsort
Pretáženie	Overload	Überlastung
Priestorové vzplanutie	Flashover	Räumliche Entflammung
Príčina	Cause	Grund
Príčina požiaru	Fire Cause	Feuergrund
Produkty horenia	Combustion Products	Verbrennungsprodukte
Prúdenie	Convection	Konvektion
Prúdenie pod stropom	Ceiling Jet	Konvektion unter der Decke
Prvý zapálený materiál	Material First Ignited	Erste gezündet Material
Pyroforický materiál	Pyrophoric Material	Pyrophoric Material
Rekonštrukcia miesta požiaru	Fire Scene Reconstruction	Feuerszene rekonstruktion
Riziko	Risk	Risiko
Rozsah horľavosti	Flammable Range	Grenzen der Entzündbarkeit
Rozvoj požiaru	Fire Propagation	Brandausbreitung
Rýchlosť horenia	Burning Rate	Brenngeschwindigkeit
Rýchlosť uvoľňovania dymu	Smoke Production Rate	Rauchfreisetzung Geschwindigkeit
Rýchlosť uvoľňovania CO	CO Production Rate	CO Freisetzung Geschwindigkeit
Rýchlosť uvoľňovania tepla	Heat Release Rate	Wärmefreisetzung Geschwindigkeit
Samovznietenie	Autoignition	Selbstentzündung
Samovznietenie	Self-Ignition	Selbstentzündung
Samozahrievanie	Self-Heating	Selbstheizung
Sadze	Soot	Ruß
Sekundárna explózia	Secondary Explosion	Sekundärer Explosion
Spontánne vznietenie	Spontaneous Ignition	Spontanentzündung
Spontánne zahrievanie	Spontaneous Heating	Spontanheizung
Šírenie požiaru	Fire Spread	Brandausbreitung
Tepelná inercia	Thermal Inertia	Wärmeträgheit
Tepelná radiácia	Radiation	Strahlung
Tepelná rozťažnosť	Thermal Expansion	Wärmeausdehnung
Teplo	Heat	Wärme
Teplo potrebné na iniciáciu	Heat of Ignition	Entzündungswärme
Teplota	Temperature	Temperatur
Teplota riadeného zapálenia	Piloted Ignition Temperature	Pilotiert Zündtemperatur
Teplota samovznietenia	Autoignition Temperature	Selbstentzündungstemperatur
Teplota samovznietenia	Self-Ignition Temperature	Selbstentzündungstemperatur
Teplota vznietenia	Spontaneous Ignition Temperature	Zündtemperatur
Teplota vzplanutia	Flash Ignition Temperature	Flammpunkt Temperatur
Úmyselná príčina požiaru	Incendiary Fire Cause	Absichtliche Ursache des Feuers
Úmyselný požiar	Arson	Brandstiftung
Vodivosť	Conduction	Leitung
Vrstva pod stropom	Ceiling Layer	Deckenschicht
Vysoko výbušný materiál	High Explosive	Hochexplosives Material
Výbuch splodín horenia	Backdraft	Backdraft

Výbušnina	Explosive	Explosive
Výťažok dymu	Smoke Yield	Rauchausbeute
Výťažok CO	CO Yield	CO Ausbeute
Vznietenie	Ignition	Zündung
Vzory stôp po požiari	Fire Patterns	Feuermuster
Vzostupný prúd horúcich plynov	Fire Plume	Feuersäulen
Zisťovanie príčin vzniku požiarov	Fire Investigation	Branduntersuchung
Zničenie dôkazov	Spoilation	Beweisvernichtung
Zodpovednosť	Responsibility	Verantwortung
Zuhoľnatenie	Char	Verkohlung
Žeravenie	Glowing Combustion	Glühende Verbrennung

A

Akcelerátor požiaru: horľavá alebo oxidačná látka, obvykle horľavá kvapalina, použitá na iniciáciu alebo urýchlenie rozvoja alebo šírenia požiaru.

Analýza požiaru: proces určenia miesta vzniku, príčiny, vývoja, zodpovednosti, a v prípade potreby aj analýzy zlyhania požiaru alebo výbuchu.

Analýza zlyhania: logické, systematické preskúmanie prvku, súčasti, zostavy alebo konštrukcie a jeho umiestnenia a funkcie v systéme, vykonané za účelom identifikácie a analýzy pravdepodobnosti, príčin a následkov potenciálneho a reálneho zlyhania.

B

Bezprostredná príčina: príčina, ktorá priamo spôsobuje účinok bez zásahu inej príčiny.

Bod vzplanutia kvapaliny: najnižšia teplota kvapaliny, stanovená špecifickými laboratórnymi skúškami, pri ktorej sa z kvapaliny uvoľňujú pary s dostatočnou intenzitou na udržanie prechodného plameňa po povrchu kvapaliny.

C

Čas iniciácie: čas medzi priložením zápalného zdroja k materiálu a začiatkom procesu horenia.

Časová os: grafické znázornenie udalostí pri požiari, zobrazené v chronologickom slede.

D

Deduktívne uvažovanie: proces, pri ktorom sa vyvodzujú závery logickým usudzovaním na základe daných faktov.

Deflagrácia: šírenie zóny horenia rýchlou, ktorá je nižšia ako rýchlosť zvuku v médiu, v ktorom neprebehla reakcia.

Detonácia: šírenie zóny horenia rýchlou, ktorá je vyššia ako rýchlosť zvuku v médiu, v ktorom neprebehla reakcia.

Difúzny plameň: plameň, v ktorom sa palivo a vzduch miešajú v zóne horenia.

Dym: zmes tuhých (častočky uhlíka), kvapalných a plyných splodín horenia.

Dynamika požiaru: podrobná štúdia o tom, ako chémia, požiarová veda a inžinierske disciplíny mechaniky tekutín a prenosu tepla vzájomne ovplyvňujú správanie požiaru.

E

Efektívne teploty pri požiari: Teploty dosiahnuté pri požiariach, kde dochádza k fyzickým účinkom, ktoré môžu byť viazané na určité teplotné rozsahy.

Elektrická iskra: malá žiariaca častica vytvorená pri niektorých (elektrických) oblúkoch.

Elektrický skrat: poruchové spojenie s nízkym odporom medzi vodičmi v normálnom obvode, kde je odpor za normálnych okolností oveľa vyšší.

Energia vznietenia: množstvo tepelnej energie, ktorú musí materiál prijať, aby sa zapálil a horel.

Explózia: náhla premena potenciálnej energie (chemickej alebo mechanickej) na kinetickú energiu spojená s produkciou a uvoľnením plynov pod tlakom, alebo len s uvoľnením plynov pod tlakom.

Explozívne horenie dymu: horenie nezhorených produktov termického rozkladu pri ich úniku z požiarneho úseku do exteriéru.

F

Forenzná veda: aplikácia vedeckých postupov na zodpovedanie otázok, potrebných pre konanie pred súdom.

H

Horľavá kvapalina: bod vzplanutia od 37,8 °C (Combustible Liquid) – akákoľvek kvapalina, ktorá má v uzatvorenom téglíku bod vzplanutia 37,8 °C alebo vyšší.

Horľavá kvapalina: bod vzplanutia pod 37,8 °C (Flammable Liquid) – kvapalina, ktorá má v uzavretom téglíku bod vzplanutia nižší ako 37,8 °C.

Horľavý: schopný horenia.

Hustota: hmotnosť látky na jednotku objemu.

I

Induktívne uvažovanie: proces, keď osoba začína s konkrétnou skúsenosťou a postupuje ku zovšeobecneniu.

K

Kritická hustota tepelného toku: Minimálna hustota tepelného toku, prenášaného tepelnou radiáciou alebo prúdením, potrebná na iniciáciu materiálu.

M

Medza horľavosti: horná alebo dolná medzná koncentrácia horľavých plynov alebo pár horľavej kvapaliny vo vzduchu, pri stanovenej teplote a tlaku; vyjadrená ako percentuálny podiel horľavej látky, ktorý sa môže vznietiť v danom objeme.

Miesto činu: onkrétno fyzické miesto incidentu v rámci miesta udalosti v širšom zmysle.

Miesto výbuchu: trhlina typu krátera vytvorená na mieste vzniku výbuchu.

Miesto vzniku: miestnosť alebo priestor, kde vznikol požiar.

N

Nadprúd: každý prúd, prevyšujúci menovitý prúd spotrebiča alebo zatažiteľnosť vodiča.

Nedostatok kyslíka: nedostatočný prívod kyslíka na horenie.

Nehorľavý materiál: materiál, ktorý vo forme, v akej sa používa a za vopred určených podmienok sa nezapáli, nehorí, nepodporuje horenie ani neuvoľňuje horľavé pary, ak je vystavený účinkom ohňa alebo tepla.

O

Oblúk: vysokoteplotný svetelný elektrický výboj cez medzeru alebo cez médium ako je napr. spálená izolácia.

Odkvapkávanie: šírenie požiaru odkvapkávaním alebo pádom horľavých materiálov.

Okolité: obklopujúci, vzťahujúci sa najmä na miestne prostredie, ako je okolitý vzduch a teplota okolia.

Opätovné vzplanutie: obnova plameňového horenia po zdanlivom, avšak neúplnom zahasení.

P

Palivo: materiál, ktorý udrží horenie za špecifikovaných podmienok prostredia.

Plameň: vzostupný prúd horúcich plynov (chemické zloženie plynov je v závislosti od mies-

ta v plameni veľmi variabilné – od čistej horľaviny, resp. u tuhých materiálov plyných produktov termického rozkladu až po CO_2 a H_2O) a rozptýlených jemných čiastočiek s vysokým obsahom uhlíka (sadzí).

Plynné palivo: zemný plyn, priemyselne vyrábaný plyn, skvapalnený propán-bután a podobné plyny bežne používané na komerčné účely alebo pre domácnosti.

Požiar: proces rýchlej oxidácie, čo je chemická reakcia spojená s vývojom svetla a tepla v meniacej sa intenzite.

Požiar riadený odvetraním: požiar, pri ktorom je rýchlosť uvoľňovania tepla alebo rozvoj kontrolovaný prívodom vzduchu.

Požiar riadený palivom: požiar, pri ktorom je rýchlosť uvoľňovania tepla a rýchlosť rozvoja kontrolovaná vlastnosťami paliva.

Požiarne veda: súhrn poznatkov týkajúci sa výskumu požiaru a súvisiacich tém (ako je horenie, plamene, produkty horenia, uvoľňovanie tepla, prenos tepla, chémia horenia a výbuchu, dynamika požiaru a výbuchu, termodynamika, kinetika, mechanika tekutín, protipožiarne bezpečnosť) a ich interakcia s ľuďmi, konštrukciami a prostredím.

Požiarne riziko: pravdepodobnosť vzniku požiaru a stupeň jeho následkov na osoby, majetok a životné prostredie.

Požiarne zaťaženie: celkové množstvo horľavého obsahu budovy, priestoru alebo horiacej plochy vrátane vnútornej povrchovej úpravy a omietky, vyjadrené v jednotkách tepla alebo ako ekvivalent hmotnosti dreva.

Presné miesto vzniku: presná fyzická lokalita kontaktu tepelného zdroja s palivom, kde vznikol požiar.

Pretiaženie: používanie spotrebiča s prekročením normálneho celkového zaťaženia, alebo používanie vodiča presahujúce jeho menovitú zatažiteľnosť.

Priestorové vzplanutie: nelineárna forma rozvoja požiaru z lokálneho do plne rozvinutého.

Príčina: okolnosti, podmienky alebo interakcie, ktoré vyvolali alebo mali za následok požiar alebo výbuch.

Príčina požiaru: okolnosti, podmienky alebo interakcie, pri ktorých došlo k spojeniu horľavého materiálu, zápalného zdroja (iniciátora vznietenia) a oxidačného činidla (vzduch, kyslík), čo spôsobilo požiar alebo výbuch sprevádzaný horením.

Produkty horenia: teplo, plyny, pevné častice a kvapalné aerosóly vzniknuté horením.

Prúdenie: prenos tepla cirkuláciou v rámci média, ako je plyn alebo kvapalina.

Prúdenie pod stropom: pomerne tenká vrstva prúdiacich horúcich plynov, ktorá vzniká pod stropom v dôsledku dopadania stúpajúcich splodín horenia, pričom prúdiaci plyn je nútený pohybovať sa vo vodorovnom smere.

Prvý zapálený materiál: palivo, ktoré sa zapáli ako prvé pôsobením tepla potrebného na vznietenie.

Pyroforický materiál: akákoľvek látka, ktorá sa spontánne vznieti po jej vystavení účinkom atmosférického kyslíka.

R

Rekonštrukcia miesta požiaru: proces uvedenia vecí na mieste činu do takej polohy, v akej boli pred požiarom.

Riziko: stupeň nebezpečenstva.

Rozsah horľavosti: rozsah koncentrácií medzi dolnou a hornou medzou horľavosti.

Rozvoj požiaru: šírenie požiaru.

Rýchlosť horenia: rýchlosť uvoľňovania tepla.

Rýchlosť uvoľňovania dymu: rýchlosť uvoľňovania dymu z procesu horenia.

Rýchlosť uvoľňovania CO: rýchlosť uvoľňovania CO z procesu horenia.

Rýchlosť uvoľňovania tepla: rýchlosť uvoľňovania tepla z procesu horenia.

S

Sadze: čierne častice uhlíkov vznikajúce v plameňoch.

Samovznietenie (Autoignition): iniciácia horenia vplyvom tepla, bez iniciácie iskrou alebo plameňom; (Self-Ignition): vznietenie spôsobené samozahrievaním.

Samozahrievanie: výsledok exotermických reakcií, ku ktorému dochádza spontánne u niektorých materiálov za určitých podmienok, pričom sa uvoľňuje teplo dostatočnou rýchlosťou na to, aby zvýšilo teplotu materiálu.

Sekundárna explózia: každý nasledujúci výbuch v dôsledku pôvodnej explózie.

Spontánne vznietenie: vznietenie spôsobené samozahrievaním.

Spontánne zahrievanie: proces, pri ktorom narastá teplota materiálu bez prijímania tepla zo svojho okolia.

Šírenie požiaru: šírenie požiaru z jedného miesta na druhé.

T

Tepelná inercia: vlastnosti materiálu, ktoré charakterizujú rýchlosť nárastu jeho povrchovej teploty, keď je vystavený ohňu. Tepelná inercia súvisí s tepelnou vodivosťou materiálu, jeho hustotou a tepelnou kapacitou.

Tepelná radiácia: prenos tepla prostredníctvom elektromagnetického žiarenia.

Tepelná roztťažnosť: nárast dĺžky, objemu alebo povrchovej plochy telesa s nárastom teploty.

Teplo: forma energie charakterizovaná vibráciou molekúl a schopná iniciácie a podpory chemických zmien a zmien stavu (skupenstva).

Teplo potrebné na iniciáciu: tepelná energia potrebná na iniciáciu materiálu.

Teplota riadeného zapálenia: minimálna teplota, ktorú musí látka dosiahnuť, aby sa zapálila za špecifických skúšobných podmienok.

Teplota samovznietenia (Autoignition Temperature): najnižšia teplota, pri ktorej sa horľavý materiál vznieti na vzduchu bez prítomnosti iskry alebo plameňa; (Self-Ignition Temperature): najnižšia teplota, pri ktorej dôjde k vznieteniu materiálu na základe jeho vlastností samozahrievania.

Teplota vznietenia: minimálna teplota, ktorú musí látka dosiahnuť, aby sa zapálila za špecifických podmienok skúšky.

Teplota vzplanutia: minimálna teplota, ktorú musí látka dosiahnuť, aby sa zapálila za špecifických podmienok skúšky (na rozkladné produkty pôsobí pomocný iniciačný zdroj).

U

Úmyselná príčina požiar: požiar, ktorý je úmyselne založený za okolností, keď daná osoba vie, že by sa oheň nemal zapáliť.

Úmyselný požiar: Úmyselný trestný čin, pri ktorom vznikne požiar alebo explózia.

V

Vodivosť: Prenos tepla na iné teleso alebo v rámci telesa priamym kontaktom.

Vrstva pod stropom: stúpajúca vrstva horúcich plynov a dymu vznikajúca pri požiaroch v uzavretých priestoroch.

Vysoko výbušný materiál: materiál, ktorý je schopný udržať front reakcie, ktorá prebieha cez nezreagovaný materiál rýchlou, rovnajúcou sa alebo vyššou ako je rýchlosť zvuku v tomto médiu.

Výbuch splođín horenia: deflagrácia v dôsledku náhleho prívodu vzduchu do uzavretého priestoru s deficitom kyslíka a s vysoko zahriatymi produktmi nedokonalého spálenia.

Výbušnina: akákoľvek chemická zlúčenina, zmes alebo prostriedok, ktorá vyvolá výbuch.

Výťažok dymu: množstvo dymu uvoľnené z jednotkového množstva horľavej látky.

Výťažok CO: množstvo CO uvoľnené z jednotkového množstva horľavej látky.

Vznietenie: Proces iniciácie materiálu tepelnou radiáciou alebo pudením, bez pomocného zdroja iniciácie.

Vzory stôp po požiari: viditeľné alebo merateľné fyzické zmeny alebo identifikovateľné útvary, ktoré vytvoril jeden alebo viaceré účinky požiaru.

Vzostupný prúd horúcich plynov: stĺp horúcich plynov, plameňov a dymu stúpajúci nad lokálnym požiarom.

Z

Zisťovanie príčin vzniku požiarov: proces stanovenia miesta vzniku, príčiny a vývoja požiaru alebo výbuchu.

Zničenie dôkazov: strata, deštrukcia alebo materiálová zmena nejakého predmetu alebo dokumentu, ktorý je dôkazový alebo má potenciál slúžiť ako dôkazový materiál pri súdnom procese, ak je táto škoda spôsobená osobou, ktorá je zodpovedná za úschovu daného dôkazu.

Zodpovednosť: zodpovednosť osoby alebo subjektu za udalosť alebo sled udalostí, ktoré spôsobili požiar alebo výbuch, rozšírenie požiaru, telesné poranenie, usmrtenie alebo majetkové škody.

Zuhoľnatenie: zuhoľnatený materiál, ktorý bol spálený alebo pyrolyzovaný.

Žeravenie: horenie pevných materiálov bez viditeľného plameňa.

Definície odborných termínov boli prevzaté z NFPA 921:2014. Pri spracovaní slovníka sa vychádzalo z textu citovanej NFPA v pôvodnom znení, ako aj z prekladu do Slovenského jazyka, ktorý spracoval Požiarnotechnický a expertízny ústav MV SR v Bratislave. Vybrané definície uvádzané v NFPA 921:2014 boli prevzaté z NFPA 53:2011, NFPA 68:2007, NFPA 72:2010 a NFPA 654:2006.

Príloha I Zoznam symbolov a skratiek

α	Teplotný koeficient odporu	($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
α	Koeficient rýchlosti rozvoja požiaru	($\text{kW}\cdot\text{s}^{-1}$)
α	Koeficient prisávania vzduchu do vzostupného prúdu horúcich plynov (0,116)	(-)
β	Korekčný koeficient	(-)
β	Zlomok odvedeného tepla do ohraničujúcich konštrukcií	(-)
β_i	Korene charakteristickej rovnice $\text{tg } \beta = \text{Bi}/\beta$	(rad)
δ	Hrúbka materiálu ohraničujúcej konštrukcie	(m)
ε	Emisivita povrchu materiálu	(-)
ε_i	Emisivita teplejšieho povrchu	(-)
ε_2	Emisivita chladnejšieho povrchu	(-)
ε_{12}	Výsledná emisivita, ktorá sa počíta podľa rovnice [2.36]	(-)
$\varepsilon_{\text{CO}_2}$	Emisivita oxidu uhličitého	(-)
$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$	Emisivita vodnej pary	(-)
ε_p	Emisivita plynu	(-)
ε_s	Emisivita povrchu stien	(-)
ε_{SP}	Emisivita svetivého plameňa	(-)
ε_s'	Emisivita povrchu stien pri výmene tepla radiáciou s nesvietivým plameňom	(-)
$\Delta\varepsilon$	Korekcia vzájomného prekrytia spektier CO_2 a H_2O	(-)
η	Podiel energie vyžiarenej radiáciou k elektrickému príkonu žiarovky (-)	(-)
λ	Koeficient tepelnej vodivosti	($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
λ_i	Koeficient tepelnej vodivosti jednoduchkej steny alebo i -tej vrstvy zloženej steny	($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
λ_k	Koeficient efektívneho prestupu tepla ohraničujúcich konštrukcií	($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
λ_{max}	Vlnová dĺžka pri ktorej je (pri teplote T) intenzita vyžarovania maximálna (mm)	
λ_{str}	Stredná hodnota koeficienta tepelnej vodivosti v intervale teplôt od t_1 do t_2	($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$	Koeficient tepelnej vodivosti v smere súradnicových osí	($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
ρ	Objemová hmotnosť látky	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ	Merný elektrický odpor vodiča	($\Omega\cdot\text{m}^{-1}$)
ρ_a	hustota okolitého vzduchu	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_c	Merný elektrický odpor stykovej plochy medzi vodičmi	($\Omega\cdot\text{m}^{-1}$)
ρ_g	hustota vrstvy dymu	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
δ_i	Hrúbka jednoduchkej steny alebo i -tej vrstvy zloženej steny	(m)
σ	Stephan-Boltzmannova konštanta $5,67\cdot 10^{-8}$	($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)
σ	Povrchová hustota elektrického náboja	($\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$)
τ	Čas	(s)
τ	Časová konštanta vybíjania	(s)
ϕ_i	Uhol, ktorý zvierajú spojnice stredov plôch A_1 a A_2 a normála plochy A_1	($^{\circ}$)

ϕ_2	Uhol, ktorý zvierajú spojnice stredov plôch A_1 a A_2 a normála plochy A_2	($^\circ$)
ϕ_{12}	Uhlový koeficient ožiarenia	(-)
ϕ_i	Fázový posun prúdu voči napätiu	(rad)
ϕ_u	Fázový posun napätia voči prúdu	(rad)
ϕ_{dmv}	Dolná koncentračná medza výbušnosti horľavého plynu alebo pary	(obj. %)
χ_r	Podiel tepla prenášaný vo fáze lokálneho požiaru radiáciou (zvyčajne sa uvažuje s hodnotou 0,3)	(-)
ω	Uhlová frekvencia	(rad.s ⁻¹)
Ψ	Parameter vyjadrujúci požiarne zaťaženie a odvetranie požiarneho úseku	(kg.m ⁻²)
Θ	Bezrozmerná teplota	(-)
ϕ	Ekvivalentný pomer	(-)
ϕ_i	Čiastkový polohový faktor	(-)
Ω	Parameter odvetrania požiaru	(-)
a	Koeficient teplotnej vodivosti	(m ² .s ⁻¹)
a	Koeficient teplotnej vodivosti vzduchu, resp. teplotnosného média (hodnoty pre vzduch sú uvedené v prílohe D)	(m ² .s ⁻¹)
a	Výška žiariaceho povrchu (m) / vzdialenosť medzi stredmi žiariaceho a ohrievaného povrchu (m)	(-)
a_v	Koeficient objemovej rozťažnosti vzduchu, resp. teplotnosného média (počíta sa podľa rovnice [2.28])	(m ⁻¹)
b	Univerzálna konštanta 2,898	(mm.K)
b	Šírka žiariaceho povrchu (m) / vzdialenosť medzi stredmi žiariaceho a ohrievaného povrchu (m)	(-)
b	Polomer vzostupného prúdu horúcich plynov	(m)
$b_{\Delta T}$	Vzdialenosť od osi po bod v ktorom klesne teplota na 50% teploty v osi	(m)
c	Špecifická tepelná kapacita	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
c_p	Špecifická tepelná kapacita látky pri konštantnom tlaku	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
c_p	Merná tepelná kapacita vzduchu, pri teplote 20 °C sa uvažuje s hodnotou 1,005	(kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
c_{pi}	Špecifická tepelná kapacita (pri konštantnom tlaku) i-tej zložky spalín	(J.K ⁻¹ .mol ⁻¹)
c_p^T	Špecifická tepelná kapacita pri konštantnom tlaku a teplote T	(J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
$\text{cfr}(z)$	Gaussova chybová funkcia, ktorá sa počíta podľa rovnice [2.21]	(-)
f	Frekvencia striedavého napätia a prúdu	(Hz = s ⁻¹)
f	Koeficient vyjadrujúci mesto vzniku požiaru, požiar v strede miestnosti $f=1$, požiar pri stene $f=1,3$ a požiar v rohu miestnosti $f=1,7$	(-)
g	Koeficient tiažového zrýchlenia na povrchu Zeme: 9,81	(m.s ⁻²)
grad T	Gradient teploty	(K)
h	Koeficient prestupu tepla	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
h	Výška nad neutrálnou rovinou	(m)

h_c	Koeficient prestupu tepla zo steny do plynného prostredia	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
h_i	Koeficient prestupu tepla z plynného prostredia do steny	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
i, j, k	Jednotkové vektory v smere osí x, y, z	(-)
$\dot{x}(t)$	Okamžitá hodnota striedavého prúdu	(A)
j	Hustota elektrického prúdu	(A.m ⁻²)
k, β	Koeficienty vyjadrujúce vplyv vlastností kvapaliny na rýchlosť úbytku hmotnosti	(m ⁻¹)
L_T	Charakteristická šírky vrstvy prúdenia pod stropom podľa teplotného profilu	(m)
L_V	Charakteristická šírky vrstvy prúdenia pod stropom podľa rýchlostného profilu	(m)
m	Hmotnosť látky	(kg)
m	Empirická konštanta (pri výpočte sa osadzujú dve hodnoty 0,34 a 0,93)	(-)
m_c	Hmotnostný tok vzostupného prúdu horúcich plynov	(kg.s ⁻¹)
m_{oo}	Špecifická rýchlosť úbytku hmotnosti kvapaliny v nádrži s nekonečným priemerom	(kg.m ⁻² .s ⁻¹)
m_f	Hmotnosť plynného paliva v zóne horenia	(g alebo kg)
m_i	Hmotnosť zložky i uvoľnenej do splodín horenia	(g)
m_{ox}	Hmotnosť kyslíka v zóne horenia	(g alebo kg)
m''	Špecifická rýchlosť úbytku hmotnosti kvapaliny v nádrži s priemerom D	(m)
n	Konštanta	(-)
n	Mocninový parameter (zvyčajne sa uvažuje s hodnotou 2)	(-)
n	Polytropický exponent	(-)
n_i	Látkové množstvo i -tej zložky spalín	(mol)
$(n_A)_s$ a $(n_A)_m$	Látkové množstvá zložky A vo fáze stacionárnej a mobilnej	(mol)
p	Atmosférický tlak vzduchu	(kPa)
q_c	Hustota tepelného toku prenášaného tepelnou konvekciou	(W.m ⁻²)
q_k	Hustota tepelného toku vedením	(W.m ⁻²)
q_r	Hustota tepelného toku vyžarovaného z povrchu tuhého telesa	(W.m ⁻²)
q_t	Hustota tepelného toku prenášaného rovinnou stenou situovanou medzi plynným prostredím s teplotami t_i a t_c	(W.m ⁻²)
q_v	Energia uvoľnená z jednotky objemu telesa za jednotku času	(W.m ⁻³)
q_{NPS}	Hustota tepelného toku z nesvietivého plameňa do stien	(W.m ⁻²)
q_{PS}	Hustota tepelného toku zo svietivého plameňa do stien	(W.m ⁻²)
q^{30}	Množstvo uvoľneného tepla z jedného gramu uhlia počas 30 minútovej interakcie uhlia s kyslíkom pri teplote 30 °C a normálnom atmosférickom tlaku	(J.g ⁻¹)
\dot{q}''	Hustota tepelného toku dopadajúca na povrch vzorky	(kW.m ⁻²)
\dot{q}''	Hustota tepelného toku vyžarovaného z povrchu žiarovky	(W.m ⁻²)
\dot{q}''_{cr}	Kritická hustota tepelného toku vzorky	(W.m ⁻²)
r	Vzdialenosť medzi stredom plôch A_1 a A_2	(m)
r	Stechiometrický koeficient – hmotnosť paliva na dokonalé spálenie ktorého je potrebná jednotková hmotnosť kyslíka	(kg.kg ⁻¹)

r	Radiálna vzdialenosť od osi fire plume	(m)
r	Radiálna vzdialenosť bodu v ktorom sa počíta rýchlosť prúdenia od osi	(m)
r_v	Množstvo vzduchu potrebné na dokonalé spálenie jednotkového množstva látky	(kg.kg ⁻¹)
t	Teplota	(°C)
t	Čas	(s)
t_o	Počiatočná teplota materiálu	(°C)
t_1	Dolná hodnota intervalu teplôt v ktorom sa stanovuje λ_{str}	(°C)
t_2	Horná hodnota intervalu teplôt v ktorom sa stanovuje λ_{str}	(°C)
t_{\square}	Čas potrebný na dosiahnutie referenčnej rýchlosti uvoľňovania tepla 1 MW	(s)
t_a	Teplota tekutiny (vzduchu) prúdiacej okolo tuhej látky	(°C)
t_a	Teplota vodiča pred vznikom skratu	(°C)
t_c	Teplota na ochladzovanej strane	(°C)
t_c	Teplota v materiáli v súradnici X po čase \square	(°C)
t_c	Teplota chladnejšieho plynného prostredia (napr. v zimnom období teplota vzduchu v exteriéri alebo počas požiaru teplota vzduchu na neohrievanej strane steny)	(°C)
t_i	Teplota v mieste vzniku skratu v okamihu prerušenia obvodu istiacim prístrojom	(°C)
t_h	Teplota na ohrievanej strane	(°C)
t_h	Teplota povrchu tuhej látky	(°C)
t_h	Teplota prostredia alebo média ohrievajúceho materiál	(°C)
t_{ch}	Charakteristická stredná teplota	(°C)
t_i	Teplota teplejšieho plynného prostredia (napr. v zimnom období teplota vykurovaného interiéru alebo počas požiaru teplota plynov v požiarom úseku)	(°C)
t_i	Čas iniciácie – čas v ktorom rýchlosť uvoľňovania tepla zo vzorky prvý krát dosiahne hodnotu 50 kW.m ⁻²	(min)
t_{ign}	Čas do iniciácie vzorky	(s)
t_p	Teplota na jednej strane povrchu polomasívu po jej skokovej zmene	(°C)
t_p	Čas tepelnej penetrácie konštrukcie	(s)
t_x	Teplota v jednoduchej rovinnej stene v bode vzdialenom od jej ohrievanej strany o x m alebo na povrchu vrstvy zloženej steny oddelenej od jej ohrievanej steny x vrstvami	(°C)
t_K	Kritická teplota látky	(°C)
t_R	Elučný čas	(s)
$\square t$	Rozdiel teplôt medzi teplotnosným médiom a ohrievaným materiálom	(°C)
Δt	Rozdiel medzi teplotou vodiča a referenčnou teplotou	(°C)
u_{os}	Rýchlosť prúdenia vzostupného prúdu horúcich plynov v osi vo výške z	(m.s ⁻¹)
$u_{os,r}$	Rýchlosť prúdenia vzostupného puđu horúcich plynov vo vzdialenosti r od osi	(m.s ⁻¹)
$u(t)$	Okamžitá hodnota striedavého napätia	(V)

$u(t)_1, u(t)_2, u(t)_3$	Okamžité hodnoty fázových napätí	(V)
ν	Kinematická viskozita vzduchu, resp. teplotnosného média (hodnoty pre vzduch sú uvedené v prílohe D)	($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
ν_{\max}	Maximálna rýchlosť prúdenia pod stropom	(K)
x, y, z	Priestorové súradnice	(m)
x	Vzdialenosť od ohrievanej strany jednoduchej rovinatej steny alebo počet vrstiev zloženej steny od jej ohrievanej strany po bod v ktorom sa počíta teplota	(°C)
x	Hĺbka (pod povrchom materiálu na ktorej nastala skoková zmena teploty) v ktorej sa počíta teplota	(m)
y_i	Výťažok zložky i splodín horenia prepočítaný na jednotku uvoľneného tepla	
y_i ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Výťažok zložky i	($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ alebo
z	Výška nad horiacim materiálom v ktorej sa počíta rýchlosť prúdenia	(m)
z	Výška nad povrchom horiaceho materiálu	(m)
$z_{\text{ip, max}}$	Maximálna výška vzostupného prúdu horúcich plynov	(m)
z_v	Výška rozhrania hornej horúcej a dolnej chladnej vrstvy – meraná od stropu	(m)
z_0	Virtuálny začiatok vzostupného prúdu horúcich plynov	(m)
A	Plocha	(m^2)
A	Prierez vodiča	(m^2)
A	Frekvenčný faktor	(-)
A, B, C, D	Lonštanty pre konkrétnu látku ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\text{J} \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\text{J} \cdot \text{K}^{-3} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\text{J} \cdot \text{K} \cdot \text{mol}^{-1}$)	
A_0	Plocha otvorených otvorov	(m^2)
A_1	Plocha teplejšieho telesa (tepelného žiariča)	(m^2)
A_2	Plocha chladnejšieho (ohrievaného) telesa	(m^2)
A_c	Plocha stykovej vrstvy	(m^2)
A_f	Plocha požiaru	(m^2)
A_i	Konštanta definovaná rovnicou [2.15]	(-)
A_r	Referenčná plocha (plocha chladnejšieho, resp. ohrievaného telesa)	(m^2)
A_p	Koeficient absorpcie	(-)
A_T	Celková plocha ohraničujúcich konštrukcií (plocha podlahy, stien a stropu bez plochy okien a dverí)	(m^2)
Bi	Biotovo číslo	(-)
C	Konštanta	(-)
C	Elektrická kapacita objektu	(F)
C_w	Bezrozmerný tlakový koeficient	(-)
D	Priemer požiaru	(m)
D	Vzdialenosť povrchu exponovaného vzorky od stredy vlákna žiarovky	(m)
D	Priemer nádrže	(m)
E	Energia výboja	(J)
E	Aktivačná energia	($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)

E_p	Intenzita vyžarovania plynu do dokonale čierneho priestoru s teplotou 0 K	(W.m ⁻²)
Fo	Fourierovo číslo	(-)
F_m	Objem mobilnej fázy pretečenej kolónou za jednotku času	(m ³)
H	Výška priestoru	(m)
H_0	Výška otvorených otvorov	(m)
HaZZ	Hasičský a záchranný zbor	(-)
HRR	Rýchlosť uvoľňovania tepla vo fáze rozvoja požiaru	(MW)
HRR(<i>t</i>)	Okamžitá rýchlosť uvoľňovania tepla v čase <i>t</i>	(kW.m ⁻²)
<i>l</i>	Účinná hrúbka vrstvy žiarivého plynu	(m)
<i>I</i>	Veľkosť elektrického prúdu tečúceho obvodom	(A)
<i>I</i>	Intenzita svetelného lúča po prechode vrstvou dymu	(-)
I_0	Pôvodná intenzita svetelného lúča	(-)
$I_{1cf}, I_{2cf}, I_{3cf}$	Efektívne hodnoty fázových prúdov	(A)
$I_{12cf}, I_{23cf}, I_{13cf}$	Efektívne hodnoty združených prúdov medzi krajnými vodičmi 1 a 2, 2 a 3, 1 a 3	(A)
$I_{1max}, I_{2max}, I_{3max}$	Maximálne hodnoty fázových prúdov	(V)
l_c	Hrúbka stykovej vrstvy	(m)
I_{cf}	Efektívna hodnota striedavého prúdu	(A)
I_{max}	Maximálna hodnota striedavého prúdu	(A)
I_{IG}	Index iniciácie	(min ⁻¹)
I_Q	Index rýchlosti uvoľňovania tepla	(-)
$I(t)_1, I(t)_2, I(t)_3$	Okamžité hodnoty fázových prúdov	(V)
K_D	Distribučná konštanta	(-)
K_s	Koeficient	(-)
<i>L</i>	Hrúbka vrstvy dymu	(m)
<i>L</i>	Charakteristický rozmer	(m)
<i>L</i>	Hrúbka vzorky materiálu od ktorej sa tento považuje za tepelne hrubý	(mm)
<i>L</i>	Priemerná výška plameňa	(m)
L_h	Vodorovná vzdialenosť, na ktorú sa rozšíri plameň pod stropom	(m)
M_i	Požiarne zaťaženie požiarneho úseku vyjadrené ekvivalentným množstvom dreva	(kg.m ⁻²)
Nu	Nusseltovo číslo	(-)
<i>P</i>	Výkon jednosmerného elektrického prúdu	(W)
<i>P</i>	Elektrický príkon žiarovky	(W)
P_c	Činný výkon striedavého elektrického prúdu	(W)
P_{zd}	Zdanlivý výkon striedavého elektrického prúdu	(W)
P_{AC}	Jouleov stratový výkon	(W)
P_{AAC}	Jouleov stratový výkon v mieste vzniku skratu	(W)
P_J	Jalový výkon striedavého elektrického prúdu	(W)
P_{KON}	Konečný tlak plynu	(Pa)
P_{POC}	Počiatočný tlak plynu	(Pa)
<i>Q</i>	Rýchlosť uvoľňovania tepla	(kW)
<i>Q</i>	Náboj na objekte	(C)
Q_c	Celkový tepelný tok prenášaný konvekciou	(W)

Q_{crit}	Kritická rýchlosť uvoľňovania tepla pre vznik javu flashover	(kW)
Q_k	Celkový tepelný tok prenášaný vedením	(W)
Q_{krit}	Kritická energia iniciácie látky	(J)
Q_r	Celkový tepelný tok prenášaný radiáciou z teplejšieho povrchu na povrch chladnejší	(W)
Q_v	Výhrevnosť paliva	(J.mol ⁻¹)
Q_v^m	Výhrevnosť na jednotku hmotnosti	(kJ.kg ⁻¹)
R	Celkový elektrický odpor obvodu	(Ω)
R	Univerzálna plynová konštanta	(8,314J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
R_0	Merný elektrický odpor pri referenčnej teplote (t_0)	(Ω .m)
R_c	Prechodový odpor v mieste vzniku skratu	(Ω)
R_t	Elektrický odpor vodiča pri teplote ($t + \Delta t$)	(Ω)
R_s	Zvodový elektrický odpor	(Ω)
R_z	Elektrický odpor vodiča pri referenčnej teplote (t_0)	(Ω)
Ra	Rayleighovo číslo	(-)
S	Celkový povrch ohraničujúcich konštrukcií priestoru v ktorom sa žiariaci plyn nachádza	(m ²)
T	Termodynamická teploty na povrchu materiálu	(K)
T	Periódna striedavého napätia a prúdu	(s)
T_1	Termodynamická teplota teplejšieho povrchu	(K)
T_2	Termodynamická teplota chladnejšieho (ohrievaného) povrchu	(K)
T_a	Teplota okolia	(K)
T_g	Teplota hornej horúcej vrstvy plynov	(K)
$T_{g(\text{max})}$	Maximálna teplota, ktorá môže byť v požiarnom úseku pri odvetraní vyjadrenom parametrom Ω dosiahnutá	(K)
T_{ign}	Teplota na povrchu vzorky v okamihu iniciácie	(K)
T_{max}	Maximálna teplota prúdenia pod stropom	(K)
T_{os}	Teplota vzostupného prúdu horúcich plynov v osi	(K)
ΔT_{os}	Nárast teploty v osi vzostupného prúdu horúcich plynov oproti teplote okolia	(K)
$\Delta T_{\text{os,r}}$	Nárast teploty oproti teplote okolia v bode vzdialenom od osi o vzdialenosť r (m)	(K)
T_p	Termodynamická teplota plynu	(K)
T_{POC}	Počiatková teplota plynu	(K)
T_s	Termodynamická teplota povrchu stien	(K)
T_{TP}	Teoretická teplota plameňa	(K)
ΔT	Nárast teploty spôsobený kompresným teplom	(K)
ΔT_g	Priemerný nárast teploty plynov v požiarnom úseku	(K)
dT_a/dz	zmena teploty okolia s výškou priestoru	(K.m ⁻¹)
U	Napätie na svorkách zdroja	(V)
U	Rozdiel potenciálov medzi objektmi	(V)
$U_{1\text{ef}}, U_{2\text{ef}}, U_{3\text{ef}}$	Efektívne hodnoty fázových napätí	(V)
$U_{12\text{ef}}, U_{23\text{ef}}, U_{13\text{ef}}$	Efektívne hodnoty združených napätí medzi krajnými vodičmi 1 a 2, 2 a 3, 1 a 3	(V)
$U_{1\text{max}}, U_{2\text{max}}, U_{3\text{max}}$	Maximálne hodnoty fázových napätí	(V)
U_{cf}	Efektívna hodnota striedavého napätia	(V)

U_{\max}	Maximálna hodnota striedavého napätia	(V)
V	Objem priestoru v ktorom sa žiariaci plyn nachádza	(m ³)
V_m a V_s	Objem mobilnej a stacionárnej fázy v chromatografickom systéme	(m ³)
V_R	Elučný objem	(-)
X	Bezrozmerná súradnica	(-)
Y_a	Počiatočná koncentrácia zložky i splodín horenia vo vzduchu	(kg.kg ⁻¹)
Y_g	Koncentrácia zložky i splodín horenia v horúcej vrstve	(kg.kg ⁻¹)