

Historický vývoj u barevně hořících ohněstrůjních složí, používaných v Evropě od 17. do počátku 19. století

Robert Matyáš

Historical development of colouring agents used in European fireworks from the 17th to the beginning of the 19th century. This article summarises the development of chemical composition of European fireworks mixtures in the seventeenth, eighteenth and in the beginning of the nineteenth century. The attention is especially paid to individual colouring agents which were used to colour the flame of a fireworks mixture. For the colouring agents, physical-chemical principles responsible for the resulting colour of the flame were explained on the basis of the knowledge of modern chemistry and pyrotechnics.

Keywords: History of fireworks • fireworks • pyrotechnics • flame coloring • flame coloring agent • black powder • gun powder

První ohňostroje se v Evropě objevují koncem 70. let 14. století. Využití našly nejen jako prostředek pobavení společnosti u příležitosti nejrůznějších oslav, ale rovněž jako prostředek válečný. První ohněstrůjní předpisy se v Evropě objevily na začátku 15. století, kdy byl vydán německý ohněstrůjní spis *Feuerwerksbuch*. Tento spis, detailně popisující ohněstrůjní techniku tehdejší doby, byl následně kopírován a doplňován dalšími autory a po Evropě se tak šířil v řadě verzí. První tištěné pojednání o ohňostrojích pak pochází z doby po roce 1560.¹

1. Chemické složení nejstarších ohněstrůjních složí

Z hlediska chemického složení byla většina evropských ohněstrůjních složí založena na černém střelném prachu,² který tvořil jejich nezbytný základ. Poměrem jednotlivých komponent černého střelného prachu se především ovlivňovala rychlost hoření prachu samotného i výsledné ohněstrůjní slože a zbarvení plamene. Barva plamene černého střelného prachu leží v úzkém spektru barev, konkrétní

¹ S. Werrett, „Fireworks and color in the sixteenth and seventeenth centuries“, *Early Sci. Med.* 20, 2015, s. 464.

² Černý střelný prach je směs dusičnanu draselného, dřevěného uhlí a síry.

barva či spíše barevný odstín je pak dán teplotou hoření černého střelného prachu, která je zodpovědná za intenzivní emisi záření černého tělesa v plamenu bohatě zastoupených pevných a kapalných zplodin hoření.³ S růstem teploty těchto zplodin se tak zbarvení plamene mění od červené přes oranžovou, žlutou až po bílou (tabulka 1). V důsledku vysoké teploty plamene černého střelného prachu (1350–1550 °C) může jeho zbarvení dosáhnout až bílé barvy.⁴

Vhodnou volbou velikosti částic dřevěného uhlí bylo možné dosáhnout i dodatečného vizuálního efektu tvorby jisker. Oranžové jiskry vznikají použitím hrubě drceného dřevěného uhlí, což při jeho použití v raketách⁵ vede k tvorbě působivého ohnivého chvostu.

³ V případě hoření černého střelného prachu o poměrech blízkých dnes používanému poměru dusičnan draselný/dř. uhlí/síra 75/15/10 vznikají přibližně 2/3 zplodin v kapalném či pevném skupenství (H. Kast, *Spreng- und Zündstoffe*, Druck und Verlag von Fiedr. Vieweg & Sohn: Braunsweig 1921, s. 56). Intenzita záření kondenzovaných zplodin a poloha maxima spektrální hustoty vyzařování je dána jen teplotou těchto zplodin hoření, přičemž dle Wienova posunovacího zákona se poloha emisního maxima ve spektru s teplotou posunuje ke kratším vlnovým délkám. Teplota plamene černého střelného prachu v závislosti na jeho složení dosahuje 1350–1550 °C (M. E. Brown – R. A. Rugunanan, „A temperature-profile study of the combustion of black powder and its constituent binary mixtures“, *Propellants, Explos. Pyrotech.* 14, 1989, s. 71–72; L. E. Harris – J. A. Lannon – R. Field – D. Husted, „Spectroscopic investigation of the combustion of black powder“, *J. Ballist.* 1, 1977, s. 353–391).

⁴ Dnešní ohněstrůjné slože na rozdíl od složí historických využívají k barvení plamene záření atomů a molekul. Toto záření je emitováno v plamenu vznikajícími jednoduchými částicemi s většinou velmi krátkou životností. K dosažení červeného zbarvení plamene se dnes využívá emise SrCl a SrOH, pro zelené zbarvení emise BaCl a BaOH, pro modré zbarvení emise CuCl a pro žluté zbarvení atomového záření sodíku. Dalších barev a barevných odstínů se dosahuje prostým mícháním barev (např. purpurová barva vzniká současnou emisí modře emitujícího CuCl a červeně emitujícího SrCl, samotná slož tedy musí obsahovat sloučeniny stroncia, mědi a chloru, přičemž konkrétní barevný odstín je pak dán poměrem obou emitujících částic v plamenu, a tedy poměrem sloučenin stroncia a mědi ve složi samotné). Využití záření atomů a molekul tak umožňuje dosažení prakticky celého spektra známých barev. Vzhledem k tomu, že prvky stroncium a baryum byly objeveny až na konci 18. století, mohli naši předkové barvení plamenu pomocí záření atomů a molekul před objevem zmíněných prvků využít jen ve velmi omezené míře (využívalo se například záření CuOH v zeleně hořících složích s obsahem mědi či záření S₂ u modře hořících složí s vysokým obsahem síry, srov. níže oddíl 3).

⁵ Rakety se využívaly jako válečný zápalný, výbušný či zstrašující prostředek nebo jako prostředek k vyvolání různých ohněstrůjných efektů pro pobavení publika. Na rozdíl od současných vojenských raket byly historické rakety svou konstrukcí primitivní.

Tab. 1. Vliv teploty na zbarvení objektů, emitujících záření černého tělesa⁶

Barva	Teplota (°C)
Temně červená	500–600
Tmavě červená	600–800
Světle třešňově červená	800–1000
Oranžová	1000–1200
Světle žlutá	1200–1400
Bílá	1400–1600

Ohněstrůjné slože se až na výjimky skládají z několika komponent. U historických ohněstrůjných složí je můžeme z hlediska jejich funkce ve složi rozdělit do čtyř základních skupin:

1. Sanytr – neboli dusičnan draselný byl až do objevu chlorečnanu draselného jediným využívaným okysličovadlem.⁷ Sanytr tvořil základ většiny ohněstrůjných složí 17. a 18. století (v samostatné formě, nebo jako komponenty černého prachu, či v obou formách).
2. Hořlaviny – jako paliva se uplatňovaly dobře hořlavé dostupné látky, jako například síra, dřevěné uhlí, pryskyřice, petrolej, asphalt, různé druhy olejů či kafr. Hořením těchto látek vzniká teplo, které je využito k vytvoření požadovaného efektu. Tyto komponenty rovněž ovlivňovaly zapalitelnost slože a rychlost jejího hoření. Podobně jako u sanytru byly síra a dřevěné uhlí přítomny ve složi ve formě samostatné, ve formě komponenty černého střelného prachu nebo v obou dvou formách.
3. Efektní látky – látky, pomocí nichž bylo možné dosáhnout požadovaného efektu ohněstrůjné slože. Příkladem mohou být komponenty tvořící jiskry

Nejčastěji se jednalo o malý papírový či bambusový válec naplněný černým střelným prachem (u ohněstrůjných raket i ohněstrůjnou složí), jehož let v prostoru byl stabilizován přípevněnou stabilizační tyčí. Vizualně se podobaly dnes běžně dostupným ohněstrůjným raketkám se stabilizační špejlí. Jako pohonné hmoty využívaly historické rakety černého prachu.

⁶ J. D. DeHaan – D. J. Icove, *Kirck's fire investigation*, Pearson Publishing: Upper Saddle River 2012, s. 38.

⁷ Jiné dusičnany (vápenatý, hořečnatý či sodný) se prakticky nevyužívaly z důvodů jejich vysoké hygroskopicity. Chlorečnan draselný objevil až v roce 1786 francouzský chemik Claude Louis Berthollet a v ohněstrůjných složích se začal využívat až v prvních desetiletích 19. století.

(hrubě drcené dřevěné uhlí, drcené sklo nebo práškové železo) či plamen barvicí látky u barevně hořících složí (více srov. níže oddíl 3).

4. Obskurní látky – látky s diskutabilní či přímo nesmyslnou funkcí. Klasickým příkladem je pálené vápno. Při kontaktu slože s vodou mělo v důsledku exotermické reakce páleného vápna s vodou dojít ke spontánnímu vznícení celé slože. Ve 20. století bylo prokázáno, že tento způsob iniciace hoření je možný jen v ideálně optimalizovaných laboratorních podmínkách, nikoliv však v podmínkách reálných.⁸

Vzhledem k absenci plamen barvicích látek v nejstarších evropských ohněstrůjních složích bylo zbarvení plamene dáno jen samotným černým střelným prachem. Autoři nejstarších předpisů ohněstrůjních složí zbarvení plamene většinou vůbec nezmiňovali, což dokládá barevnou blízkost plamene těchto složí. Příkladem nejstarších směsí pak mohou být postupy publikované Johnem Batem. Ten ve své knize *The mysteryes of nature, and art* z roku 1634 (obr. 1) uvádí dvě desítky předpisů složí. Příkladem typického předpisu přípravy ohněstrůjné slože je receptura na slož pro hvězdy:

Vem sanytru jednu libru, černého střelného prachu a síry každého půl libry, tyto musí být smíchány dohromady, a z nich vytvoř pastu s dostatečným množstvím petroleje nebo čisté vody, z této pasty vytvoříš malé kuličky a vyválíš je v suchém moučkovém střelném prachu, pak je usuš a ponech je pro své příležitosti.⁹

2. Plamen barvicí látky v evropském ohněstrůjství od 17. do počátku 19. století

Patrně první zmínku o možnosti barvit plamen nalézáme v anglickém manuskriptu *The secret of gunmen* z konce 16. století.¹⁰ Touto zmínkou je pak jedna věta s výčtem několika látek, pomocí nichž je možné vytvořit „hodně barev“. Konkrétní specifikace těchto barev ale uvedena není.¹¹

⁸ E. H. R. Davidson, „The secret weapon of Byzantium“, *Byzantinische Z.* 66, 1973, s. 70; A. Marshall, *Explosives*, J. & A. Churchill: London 1917, s. 12–13.

⁹ J. Bate, *The Mysteryes of Nature and Art*, Thomas Harper: London 1634, s. 61 (překlad z anglického originálu Robert Matyáš).

¹⁰ *The secret of gunmen*, Bodleian library, Oxford (MS Ashmole 343).

¹¹ S. A. Waltson, *The art of gunnery in renaissance England*, Ph.D. thesis, University of Toronto 1999, s. 465.

Podrobnější informaci o barvení plamene udává Lorrain Hanzelet v díle *La pyrotechnie* z roku 1630.¹² Hanzelet zde zmiňuje několik plamen barvicích látek, surmu, auripigment, kafr a měděnku.¹³ Auripigment pak uvádí u bíle hořící složce, u níž lze přidavkem měděnky změnit barvu na zelenou:

Jak se dělají ohnivé koule tak bílé, že je lze stěží pozorovat bez oslnění: Vezměte libru síry, tři libry sanytru, půl libry arabské gumy,¹⁴ čtyři unce auripigmentu, dobře je ručně promíchejte, a pokropte alkoholem a udělejte z toho dosti tvrdé těsto, do kterého přidejte půl libry drceného skla nebo křišťálu v malých zrnkách, a ne v prášku, který nechejte propadnout třídičkou nebo sítím, potom je dobře promíchejte s tak řečeným těstem a vytvarujte z něj koule takové velikosti, jaká se vám bude líbit, co nejkulatější, jak můžete, potom je nechejte vyschnout. Pokud chcete mít plamen zelený, je třeba pouze přidat trochu měděnky v prášku do směsi. Je to velmi pěkný oheň a dobře vyzkoušený a není třeba žádné další roznětky k jeho zapálení než kousku zapálené stopiny, protože jakmile se jí plamen dotkne, nezdrženlivě se zapálí. Toto je pěkné k pozdravení nějakého prince či pána, majíce v rukou koule s ohněm takto příjemným předtím, než se spustí další ohňostroje.¹⁵

Sulfidy arsenu (auripigment a realgar) se v pyrotechnice běžně používaly k barvení plamene na bílo v bíle hořících složích, a to až do 20. století.¹⁶

Dílo *La pyrotechnie* je pozoruhodné i z hlediska velkého množství krásných mědirytin zobrazujících nejrůznější vojenské prostředky, zbraně nebo výbušná či ohněstrůjtná zařízení. Příkladem mědirytiny s vyobrazením ohňostroje je ohňostroj na lodi (obr. 2).¹⁷ Na vrchol stěžně či na plachtu Hanzelet doporučuje umístit na pergamenové kůži napsaný působivý nápis (např. jméno významné osobnosti), který

¹² L. Hanzelet, *La pyrotechnie*, Par I. & Gaspard Bernard: Au Pont-à-Mousson 1630.

¹³ Surma je sulfid antimonitý Sb_2S_3 , auripigment sulfid arsenitý As_2S_3 , kafr je 1,7,7-trimethylbicyklo[2.2.1]heptan-2-on (přírodní látka, která se získávala ze stromu kastrovníku) a měděnka se svým chemickým složením blíží octanu měďnatému (dříve byla získávána reakcí kyseliny octové s mědí).

¹⁴ Arabská guma je zaschlá míza některých tropických akácií (především akácie arabské a akácie senegalské), obsahující polysacharidy. V ohněstrůjství se využívala především jako pojivo a hořlavina.

¹⁵ L. Hanzelet, *La pyrotechnie*, s. 257 (překlad z francouzského originálu Ondřej Němcák).

¹⁶ G. W. Weingart, *Pyrotechnics*, Angriff Press: Hollywood 1947, s. 9, 223; R. Lancaster, *Fireworks principles and practice*, Chemical Publishing Co: New York 2006, s. 100–101.

¹⁷ Tamtéž, s. 253.

se osvítlí svíčkami a pochodněmi. U popisu tohoto ohňostroje pak Hanzelet dále uvádí:

... navíc tam budete mít bojující muže s ohnivými chocholy, noži, sekýrami, a další střilející z mušket, arkebuz a moždířů, třaskající světlice, koule různé síly do vody, jak je řečeno na daném místě, další střilející rakety do vzduchu po tuctech, velké rakety po púltuctech nebo i jednu za druhou dle vašeho uvážení, majíce ve vaší lodi bubny, hoboje, trumpety, které mohou hrát fanfáry nebo na poplach, podle akcí, které si přejete předvést. Následující obrázek vám poskytne celou představu a na závěr můžete zažehnout stovku nebo dvě stovky kusů papíru, přitlučených jeden za druhým a spojených navzájem kousky tkanic, to jest na řečení Sbohem, a diváci tak uvěří, že vše je za ohlušujícího třesku petard rozstříleno či spáleno.¹⁸

Tento obrázek je pak přesvědčivým důkazem širokého spektra v 17. století používaných ohněstrůjných efektů. Dle Davisova názoru jsou na obrázku alegoricky zobrazeny i další tehdy běžné ohněstrůjné efekty, jako například létající draci, kteří představují v 17. století oblíbený ohněstrůjný efekt – raketou poháněný model draka, který po volném zavěšení na laně a zapálení rakety po tomto laně skutečně „letěl“. Slunce a Měsíc pak pravděpodobně představují kulové pumy.¹⁹

Další plamen barvicí látky uvádí Johannis Babington ve své monografii *Pyrotechnia or, a discourse of artificall fireworks* z roku 1635. Z barevně hořících složek zde Babington zmiňuje následující slož:

Složení pro hvězdy modré barvy s červenou	
moučkový střelný prach	8 uncí
sanytr	4 unce
síra	12 uncí

Rozmělni je velmi jemně a smíchej společně s 2 uncemi alkoholu a ½ uncí levandulového oleje, který nech dobře vyschnout předtím, než jej použiješ.²⁰

Modrá barva plamene je u této složce dosahována dvěma modře hořícími látkami – sírou a alkoholem. V předpisech pro bíle hořící složce pak Babington udává kafr.

¹⁸ Překlad z francouzského originálu Ondřej Němčák.

¹⁹ T. L. Davis, *The chemistry of powder and explosives*, Wiley: New York 1943, s. 56.

²⁰ J. Babington, *Pyrotechnia or, a discourse of artificall fireworks*, Ralph Mab: London 1635, s. 11 (překlad z anglického originálu Robert Matyáš).

V roce 1650 vydává polsko-litevský vojenský inženýr, specialista na dělostřelectvo a ohněstrůjství a zástupce velitele Korunního dělostřeleckého sboru, Casimir Siemienowicz, dílo *Artis magnæ artilleriæ*. Jedná se o jedno z nejvýznamnějších děl v oblasti dělostřelectví a ohněstrůjství 17. a 18. století, o čemž svědčí i jeho následné překlady do francouzštiny (1651), němčiny (1676), angličtiny (1729) a holandštiny (1729) a ve 20. století i do polštiny a litevštiny. Na straně 119 latinského originálu Siemienowicz popisuje účinek řady látek na zbarvení plamene raket:²¹

Nempe , si compo-
itioni alicui immiscueris certas portiones Camphoræ , producet illa ignem
album , pallidum, & lacteum ; Pix Græca, rubeum , vel æneum; Sulphur, cæ-
ruleum; Sal Armoniacum, viridem; Antimonium crudum, ruffum, mellinum,
aut buxeum; Scobs Eburnea, argenteum & candidum, sed paulò sublividum,
vel plumbeum; Scobs Succini, flavum & citreum; Pix denique dura nava-
lis, fumum atrum, fuscum , & ignem obscurantem.

Totíž když přimícháš do nějaké složky určitý poměr kafru, ona vytvoří oheň bílý, bledý a mléčný; když řeckou smůlu, pak červený²² nebo bronzový; když síru, pak modrý; když salmiak, tak zelený; když surovou surmu, tak krvavý, červený, medový nebo zimostřázový;²³ když škrábanou slonovinu, tak stříbrný a bělavý, ale i trochu šedavý nebo olověný; když škrábaný jantar, tak žlutý a citronový; nakonec tvrdou lodní smůlu, tak kouř tmavý, černý a oheň tmavý.²⁴

Dle Werrettova názoru se Siemienowicz ve svém výčtu inspiroval z předchozích publikací, což vyvolává jisté pochybnosti o tom, zda postupy byly skutečně převzaty z reálné praxe poloviny 17. století.²⁵ V každém případě se ale Siemienowiczův výčet stal inspirací pro další autory 18. a počátku 19. století. Obdobný popis nacházíme

²¹ C. Siemienowicz, *Artis magnæ artilleriæ pars prima*, Apud Ioannem Ianssonivm: Amsterdam 1650, s. 119.

²² V klasické latině i ostružinový, tedy asi hodně červený.

²³ Buxeus je odvozeno od buxus, což je zimostřáz. Tato rostlina má tmavě zelené lesklé listy a světle krémově až žlutě zbarvené dřevo. Vzhledem k dalším udávaným barvám plamene surmy má patrně Siemienowicz v tomto kontextu na mysli barvu zimostřázového dřeva.

²⁴ Překlad z latinského originálu Hana Stoklasová.

²⁵ S. Werrett, *Early Sci. Med.*, s. 467.

u Fréziera, Jonese, Smithe, Mortimera, *Encyclopedii Britannica*²⁶ a dalších, což demonstuje tehdejší běžnou praxi kopírování receptur výroby složí dalšími autory, a to většinou bez odkazu na skutečného původce. Někteří autoři Siemienowiczův výčet doplnili vlastními zkušenostmi. Frézier v díle *Traité des feux d'artifice pour le spectacle* z roku 1707 přidává k Siemienowiczovým plamen barvicím látkám měděnku pro zelenou barvu plamene a k barvení plamene do žluta dřevěné piliny.²⁷ V dalším vydání z roku 1747 Frézier svůj výčet těchto látek reviduje a obohacuje. Například v kapitole pro vytvoření bílého plamene udává:²⁸

Sanytr smísený s malou troškou síry dává bílý plamen, velmi jasný a zářivý. Kafr s ním vytvoří trochu matnější – mléčnou barvu. Kousičky slonoviny trochu více olovenou (zašedlou bílou) a vybledlou, ačkoliv nastříbrelou a bíle svítící.

Na závěr kapitoly o barvení plamene Frézier zmiňuje:

Vůbec nepochybuji, že by s pomocí chemie nešlo vyladit každou z těchto barev. Potkal jsem lékárníka, který se v tomto cvičil a který uspěl, ale zatím nepublikoval své objevy široké veřejnosti.²⁹

Toto tvrzení dokládá, že dosažení kvalitních barev ohněstrujných složí v polovině 18. století nebylo jednoduché.

Souhrnný přehled plamen barvicích látek s jejich popisovaným účinkem na zbarvení plamene, které zmiňují klíčové ohněstrujné spisy 17., 18. a počátku 19. století, je pak uveden v následující tabulce:

²⁶ A. F. Frézier, *Traité des feux d'artifice pour le spectacle*, Quay des Augustins, Chez Daniel Jollet: Paris 1707, s. 128; A. F. Frézier, *Traité des feux d'artifice pour le spectacle*, Quay des Augustins, Chez Ch. Ant. Jombert: Paris 1747, s. 35–36; R. Jones, *Artificial fire-works, improved to the modern practice from the minutest to the highest branches*, Printed for J. Millan: London 1766, s. 64; G. Smith, *The laboratory; or, school of arts: containing a large collection of valuable secrets, experiments, and manual operations in arts and manufactures*, C. Whittingham: London 1799, s. 9; G. W. Mortimer, *A manual of pyrotechny or, a familiar system of recreative fire-works*, W. Simpkin & R. Marshall: London 1824, s. 136–137; *Encyclopedia Britannica: or, a dictionary of arts, sciences, and miscellaneous literature*, 15, A. Bell and C. Macfarquhar: Edinburgh 1797, s. 690–691.

²⁷ A. F. Frézier, *Traité des feux d'artifice pour le spectacle*, 1707, s. 128.

²⁸ A. F. Frézier, *Traité des feux d'artifice pour le spectacle*, 1747, s. 35, 37.

²⁹ Překlad z francouzského originálu Ondřej Němčák.

Tab. 2. Přehled plamen barvicích látek, používaných v evropském ohněstrůjství od 17. do počátku 19. století³⁰.

Plamen barvicí látka	Zbarvení plamene ohněstrůjné slože
Slonovina	stříbrná nebo jasně bílá (Frézier 1707, Smith 1799, Anonymus 1825, Cutbush 1825), stříbrná, jasně bílá, ale i trochu šedá nebo olověná (Siemienowicz 1650)
Kafr	bílá, bledá až mléčná (Siemienowicz 1650, Frézier 1707, Jones 1766, Angelo 1815, Smith 1799, Mortimer 1824, Anonymus 1825, Cutbush 1825, Encyclopedia Britannica 1797, Ruggieri 1821)
Sanytr	bílá (Jones 1766), jasně žlutobílá (Encyclopedia Britannica 1797)
Surma	bílá (Maskall 1785, Anderson 1696, Jones 1766, Angelo 1815, Cutbush 1825) žlutá, medová až oranžově-červená (Siemienowicz 1729) načervenalá (Frézier 1747, Jones 1766, Cutbush, 1825, Encyclopedia Britannica 1797, Smith 1799), načervenalá se žlutou (Frézier 1747) červená nebo medová (Smith 1799, Anonymus 1825), červená (Frézier 1707) červená, krvavá, medová nebo zimoztrázová (Siemienowicz 1650) červenohnědá (Mortimer 1824) bělavě zelená (Cutbush 1825) modrá (Ruggieri 1821, Cutbush 1825, Audot 1825)

³⁰ V závorce uveden odkaz na autora díla danou látku zmiňujícího: C. Siemienowicz, *Artis magnæ artilleriæ pars prima*, s. 119; C. Siemienowicz, *The great art of artillery of Casimir Siemienowicz*, J. Tonson: London 1729, s. 168 (jedná se o anglický překlad C. Siemienowicz, *Artis magnæ artilleriæ pars prima*); R. Anderson, *The making of rockets*, Printed for Robert Morden: London 1696, s. 4; A. F. Frézier, *Traité des feux d'artifice pour le spectacle*, 1707, s. 128; A. F. Frézier, *Traité des feux d'artifice pour le spectacle*, 1747, s. 35–36; R. Jones, *Artificial fire-works, improved to the modern practice from the minutest to the highest branches* s. 48, 49, 64; J. Maskall, *Artificial fireworks*, 2, Author's manuscript: Woolwich 1785, s. 8, 15; *Encyclopedia Britannica: or, a dictionary of arts, sciences, and miscellaneous literature*, s. 690–691; G. Smith, *The laboratory; or, school of arts: containing a large collection of valuable secrets, experiments, and manual operations in arts and manufactures*, s. 9; T. Angelo, *Art of making fireworks, made plain and easy*, J. Bailey: London 1815, s. 8, 18, 19; G. W. Mortimer, *A manual of pyrotechny or, a familiar system of recreative fire-works*, s. 130, 136–137; Anonymus, *The art of making fire-works, detonating balls*, Willmer & Co: Liverpool 1825, s. 8; L.-E. Audot, *L'art de faire a peu de frais, les feux d'artifice pour les fêtes de famille: par M. L.-E. A.*, Libraire-Éditeur: Paris 1825, s. 17, 18, 64; J. Cutbush, *A system of pyrotechny, comprehending the theory and practice, with the application of chemistry; designed for exhibition and for wars*, Clara F. Cutbush: Philadelphia 1825, s. 158, 184, 188, 189, 220; C.-F. Ruggieri, *Principles of pyrotechnics*, MP ASSOCIATES, INC.: Buena Vista 1994, s. 74, 75, 77 (jedná se o překlad originálu C.-F. Ruggieri, *Éléments de pyrotechnie*, Bachelier, libraire, quai des Augustins: Paris 1821).

Jantar	žlutá (Maskall 1785, Jones 1766, Encyclopedia Britannica 1797, Ruggieri 1821, Audot 1825), jantarová (Jones 1766, Angelo 1815), citronově žlutá (Siemienowicz 1650, Frézier 1707, Frézier 1747, Mortimer 1824)
Dřevěné piliny	žlutá (Frézier 1707) červená u směsí s dřevěným uhlím (Jones 1766, Angelo 1815)
Achát	oranžová (Smith 1799, Anonymus 1825)
Řecká smůla	načervenalá do měděna (Siemienowicz 1729, Frézier 1707, Frézier 1747), červeno-žlutá, popř. bronzová (Jones, 1766, Mortimer 1824, Encyclopedia Britannica 1797), temně červená nebo měděná (Siemienowicz 1650)
Pryskyřice	žlutá (Ruggieri 1994) měděná (Jones 1766, Encyclopedia Britannica 1797), červená a měděná (Smith 1799, Anonymus 1825)
Heliotrop	krvavě červená (Smith 1799, Anonymus 1825)
Salmiak	žlutozelená (Cutbush 1825), nazelenalá (Siemienowicz 1729, Frézier 1707, Frézier 1747), sklon k zelené (Mortimer 1824) zelená (Siemienowicz 1650, Jones 1766, Smith 1799, Anonymus 1825, Encyclopedia Britannica 1797)
Měděnka	nazelenalá (Frézier 1707, Mortimer 1824) zelená (Audot 1825)
Síra	namodralá (Frézier 1707, Frézier 1747) modrá (Siemienowicz 1650, Jones 1766, Smith 1799, Mortimer 1824, Anonymus 1825, Encyclopedia Britannica 1797)
Alkohol	modrá (Frézier 1747, Mortimer 1824)

3. Princip tvorby barevného plamene s použitím barvicích látek, uváděných v evropských ohněstrůjných spisech od 17. do počátku 19. století

Vysvětlení zbarvení plamene s použitím barvicích látek, uváděných v evropských ohněstrůjných spisech 17., 18. a počátku 19. století (tabulka 2), zatím v odborné literatuře uvedeno nebylo. Na základě znalostí moderní chemie a pyrotechniky se proto autor tohoto příspěvku pokusil u jednotlivých barvicích látek vysvětlit princip tvorby deklarovaného zbarvení plamene.

Surma – sulfid antimonitý

U většiny plamen barvicích látek, uvedených v tabulce 2, je jednotlivými autory ohněstrůjných spisů udáváno stejné či obdobné zbarvení plamene. Výjimkou v tomto

směru je surma, pro niž je zmiňována barva plamene od bílé přes žlutou, červenou, zelenou až po modrou. Pyrotechnická literatura 20. století udává, že se surma používá do bílé hořících složí.³¹ Bílé zbarvení plamene je kromě samotného záření černého tělesa pevných a kapalných zplodin hoření černého střelného prachu rovněž podporováno emisí částice SbO, která bude pravděpodobně vznikat v plamenu hořící surmy. Tato částice emituje záření v celé oblasti viditelného spektra a výsledné zbarvení plamene tak bude blízké bílému zbarvení.³² V souladu s udávaným bílým zbarvením plamene je i vypočítaná teplota hoření směsi surma/černý střelný prach, kdy přídatek surmy teplotu plamene černého střelného prachu prakticky neovlivňuje.³³

Pravděpodobným důvodem velkého rozdílu v historickou literaturou udávaných barvách plamene bude proměnlivé složení samotného černého střelného prachu a jeho dopad na teplotu hoření, která následně ovlivňuje polohu emisního maxima ve spektru. Toto vysvětlení je podepřeno i překryvem většinou autorů udávaných barev (tabulka 2, od červené přes medovou, žlutou až bílou) se spektrem záření černého tělesa (tabulka 1, od červené přes oranžovou, žlutou až bílou). Zelené a modré zbarvení, udávané některými autory, však jednoduše vysvětlit nelze.

Nehořlavé minerály

Zajímavé je použití achátu a heliotropu. Oba nerosty jsou z hlediska chemického složení tvořeny především oxidem křemičitým. Oxid křemičitý má vysokou teplotu tání i varu (t. t. je 1713 °C a t. v. 2950 °C), přičemž tyto teploty převyšují teplotu hoření černého střelného prachu. Uvedené minerály proto budou v plamenu přítomny v pevném skupenství. Pevný oxid křemičitý je chemicky velmi stabilní a nereaktivní. U takto nereaktivního materiálu se nedá předpokládat, že by se v plamenu výrazněji účastnil chemických reakcí a generoval nějaké zářící částice. Zbarvení plamene složí s obsahem achátu a heliotropu tedy bude dáno zářením černého tělesa, a to jak kondenzovaných zplodin samotného černého prachu, tak minerály

³¹ G. W. Weingart, *Pyrotechnics*, s. 223; J. A. Conkling, *Chemistry of pyrotechnics*, Marcel Dekker Inc.: New York 1985, s. 144; H. Ellern, *Military and civilian pyrotechnics*, Chemical publishing company: New York 1968, s. 137.

³² R. W. B. Pearse – A. G. Gaydon, *The identification of molecular spektra*, Chapman & Hall Ltd.: London 1950, s. 216.

³³ Na základě výpočtu teploty hoření pomocí termochemického kódu Explo5 (software pro výpočet parametrů hoření a výbušných přeměn) odpovídá teplota hoření černého střelného prachu (o složení KNO₃/dř. uhlí/S 75/15/10, izobarický režim) 1453 °C, což je v souladu s experimentálními daty (více v poznámce pod čarou č. 3). Pro směs černého střelného prachu s 10 % surmy je teplota hoření 1457 °C, pro směs s 20 % surmy 1459 °C a pro směs s 50 % surmy pak 1453 °C. Těmto teplotám pak odpovídá bílé zbarvení plamene (tabulka 1).

samotnými. Autoři historických složí pro zmíněné minerály udávají červené až oranžové zbarvení plamene, což předpokládá relativně nízkou teplotu hoření (tabulka 1). Nízká teplota hoření pak bude dána odvodem části reakčního tepla hoření k ohřevu zmíněných minerálů.

Organické hořlaviny – jantar, pryskyřice, kafr a dřevěné piliny

U složí s obsahem jantaru a pryskyřice můžeme mimo záření černého tělesa kondenzovaných zplodin černého střelného prachu očekávat i záření pevného atomárního uhlíku. Jantar a pryskyřice tvoří bohatou směs organických sloučenin, přičemž z hlediska elementárního složení obě látky obsahují velký podíl uhlíku. Pro jantar je udáván hmotnostní obsah uhlíku přibližně 78 %³⁴ a pro pryskyřici přibližně 75 %.³⁵ Kafr (1,7,7-trimethylbicyclo[2.2.1]heptan-2-on) je organická sloučenina se sumárním vzorcem $C_{10}H_{16}O$, hmotnostní obsah uhlíku v kafru je tedy 79 %.

O tom, zda a z jaké části budou uvedené hořlaviny při svém spalování ve složi tvořit plynné oxidy uhlíku nebo pevný uhlík ve formě sazí, bude rozhodovat celková kyslíková bilance slože.³⁶ Samotný černý střelný prach a jemu obdobné směsi mají kyslíkovou bilanci silně zápornou. To znamená, že samotný černý střelný prach nemá dostatek kyslíku ke spálení veškerého „svého“ vodíku (z dřevěného uhlí), uhlíku a síry na vodu, oxid uhličitý a oxid siřičitý, a není tedy schopen napomoci oxidaci uhlíku z uvedených organických sloučenin na plynné oxidy uhlíku. Proto u složí s obsahem organických paliv s vysokým zastoupením uhlíku budou v plamenu vznikat ve značném množství i pevné saze, které budou intenzivně emitovat záření černého tělesa.³⁷ Navíc zmíněné organické sloučeniny hoří značně nižší teplotou plamene než samotný černý střelný prach. Jejich přídavek k černému střelnému prachu

³⁴ K. Fiebach – D. Grimm, „Resins, Natural“ in *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, 31, Wiley-VCH Verlag GmbH: Weinheim 2012, s. 479.

³⁵ T. Shimizu, *Fireworks, the art science and technique*, Pyrotechnica publications: Austin 1994, s. 114.

³⁶ Kyslíková bilance je ve hmotnostních procentech vyjádřený přebytek či nedostatek veškerého kyslíku v nezreagované výbušině (složí), nutného k oxidaci veškerých spalitelných složek výbušiny či slože (u černého střelného prachu vodíku, uhlíku a síry) na jejich dále již nespalitelné oxidy (H_2O , CO_2 a SO_2). V případě, že výbušina (slož) má v sobě přebytek kyslíku pro oxidaci všech spalitelných složek, má kyslíkovou bilanci kladnou, pokud má právě dostatek kyslíku, má kyslíkovou bilanci rovnou nule a v případě, že má v sobě nedostatek kyslíku pro oxidaci všech spalitelných složek, má kyslíkovou bilanci zápornou.

³⁷ Podobně jako v případě parafinové svíčky, u níž je žlutě zářící plamen generován emisí záření černého tělesa atomárního uhlíku.

bude tedy snižovat teplotu plamene slože. Tím lze snadno vysvětlit udávané červené až žluté zbarvení plamene u pryskyřice a jantaru.

Obtížnější je vysvětlení bílé zbarvení plamene u kafru. K tomu, aby plamen v důsledku záření černého tělesa zářil bíle, je nutná vyšší teplota hoření. Přídavkem kafru k černému střelnému prachu ale jeho teplota hoření rychle klesá³⁸ a zbarvení plamene se posouvá ke žluté, oranžové až červené barvě. Jediným možným vysvětlením bílého plamene by tak byl jen velmi malý obsah kafru ve složi (cca 1–2 %), což nevede k výraznějšímu poklesu teploty plamene. Navíc malé množství v plamenu vzniklého uhlíku hořením kafru by díky své vysoké emisivitě³⁹ mohlo zvýšit zářivost slože a pozorovatel by tak plamen vnímal jako zářivější než plamen pro stejnou slož bez kafru.

V případě dřevěných pilin je situace jednodušší. Dřevo obsahuje méně uhlíku než předchozí látky (jeho obsah dosahuje cca 48 %).⁴⁰ K tvorbě uhlíku (sazí) bude tedy docházet v menší míře. Jelikož teplota plamene hořícího dřeva⁴¹ je podstatně nižší než teplota plamene černého střelného prachu, bude i výsledná teplota plamene celé slože nižší, což vysvětluje i historickou literaturou udávané červené a žluté zbarvení plamene.

Slonovina

U některých komponent je velmi obtížné zodpovědně navrhnout původ historickou literaturou udávaného zbarvení plamene. Příkladem je stříbrné či světle bílé zbarvení plamene pro slože s obsahem slonoviny. Slonovina je bohatá směs organických a anorganických sloučenin, která obsahuje především kolagen a zubovinu. Z hlediska elementárního složení pak kromě vodíku, uhlíku, kyslíku a dusíku obsahuje i výrazný podíl fosforu, vápníku a hořčíku.⁴² Při hoření slonoviny tak budou

³⁸ Na základě výpočtu teploty hoření pomocí termochemického kódu Explo5 je teplota hoření černého střelného prachu (o složení KNO_3 /dř. uhlí/S 75/15/10, izobarický režim) 1453 °C, pro směs s 1 % kafru 1417 °C, pro směs s 2 % kafru 1374 °C, pro směs s 5 % kafru 1197 °C, pro směs s 10 % kafru 815 °C, pro směs s 20 % kafru 662 °C a pro směs s 50 % kafru pak 569 °C.

³⁹ Emisivita je poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa o stejné teplotě. Vysokou emisivitou a schopností vyzařovat záření vyniká především uhlík (saze).

⁴⁰ T. Shimizu, *Fireworks, the art science and technique*, s. 117.

⁴¹ Pro teplotu plamenu dřeva uvádí literatura širší rozpětí hodnot 600–1000 °C (J. D. DeHaan – D. J. Icove, *Kirck's fire investigation*, s. 105).

⁴² L. J. Matienzo – C. E. Snow, „The chemical effects of hydrochloric acid and organic solvents on the surface of ivory“, *Stud. Conserv.* 31, 1986, s. 133; E. J. Raubenheimer, „Morphological aspects and composition of African elephant (*Loxodonta africana*)

ve velké míře vznikat kondenzované zplodiny, které by opět měly emitovat záření černého tělesa. Slonovina však není dobré palivo, které by hořelo vysokou teplotou a emisní maximum tak mohlo ležet v oblasti bílého zbarvení. Zářením černého tělesa tak udávané bílé zbarvení plamene vysvětlit nelze.

Možným vysvětlením by mohl být velmi nízký obsah slonoviny ve složi (což v důsledku vysoké ceny slonoviny oproti jiným komponentám slože lze i očekávat) s malým negativním dopadem na teplotu plamene a s možným příspěvkem záření černého tělesa slonoviny samotné či spalných produktů. Druhým, ale méně pravděpodobným vysvětlením by mohl být potenciální vliv celé řady dalších zářících částic, pocházejících z bohatého elementárního složení slonoviny, s emisí v různých částech viditelného spektra. Výsledkem „míchání barev“ by pak mohla být historickou literaturou udávaná bílá či stříbrná barva (tabulka 2). V obou případech se však jedná jen o nepodložené hypotézy, k jejichž ověření by bylo nutné provést spektrální analýzu plamene slonoviny samotné i její směsi s černým střelným prachem.

Sanytr – dusičnan draselný

Někdy je udávané zbarvení plamene zdánlivě v rozporu se současnými poznatky, jako například u sanytru. Pro ten historická ohněstrůjná literatura udává žlutobílé až bílé zbarvení plamene. Soli draslíku však emitují atomové záření draslíku na červeném a fialovém konci viditelné části spektra, což lidské oko vnímá jako slabě fialové zbarvení. Autory historických ohněstrůjných knih udávané bílé až žlutobílé zbarvení plamene tedy bude opět důsledkem intenzivní emise záření černého tělesa pevných či kapalných zplodin hoření (oxidu draselného a dalších solí draslíku), které zcela zastíní slabé záření atomů draslíku. Poloha ve žlutobílé či bílé části spektra je pak dána relativně vysokou teplotou plamene slože v důsledku zvýšení obsahu kysličovadla ve složi, a tím i zlepšení kyslíkové bilance slože (na konečné produkty hoření se může zoxidovat více paliva, čímž se uvolní více energie, čímž se zvýší teplota plamene).

Měděnka

Měděnka se svým chemickým složením blíží octanu mědnatému. Při hoření ve směsi s černým střelným prachem a dalšími tehdy běžnými hořlavinami bude v plameni vznikat zářící částice CuOH, která emituje v zelené části spektra.⁴³ Intenzita

ivory“, *Koedoe* 42, 1999, s. 61; I. M. Godfrey – E. L. Ghisalberty, – E. W. Beng – L. T. Byrne – G. W. Richardson, „The analysis of ivory from a marine environment“, *Stud. Conserv.* 47, 2002, s. 33.

⁴³ A. G. Gaydon, *The spectroscopy of flames*, Chapman and Hall: London 1974, s. 355; B. E. Douda, *Theory of colored flame production*, Research and development department –

zeleného zbarvení pak bude záviset na složení ohněstrůjné slož. Z evropských autorů 17., 18. a počátku 19. století zmiňují měděnku jen někteří (tabulka 2), přičemž Frézier a Mortimer pro ni udávají jen nazelenalé zbarvení plamene. Další evropští autoři tohoto období (Siemienowicz, Jones nebo Smith) měděnku neuvádějí vůbec. Vzhledem k faktu, že „zelené“ zbarvení plamene v období do druhé poloviny 18. století (do doby, než byl objeven Ruský oheň)⁴⁴ udává jen Hanzelet, je pravděpodobné, že historické slož s obsahem měděnky neposkytovaly uspokojivě zelený plamen. Důvodem bylo nevhodné složení tehdejších ohněstrůjných slož, a to z následujících dvou příčin:

1. Absence dostatečného množství vodíku ve složi. To v konečném důsledku vedlo ke vzniku malého množství zeleně emitujících zářících částic CuOH v plamenu. V případě černého střelného prachu jsou jediným zdrojem vodíku organické těkaviny v dřevěném uhlí. Jejich obsah je ale poměrně nízký a důsledkem je i nízká koncentrace CuOH v plamenu.

2. Tvorba velkého množství kondenzovaných zplodin hoření, zářících zářením černého tělesa. Toto záření vymývá, neboli zastíňuje zelenou emisi CuOH a výsledné zelené zbarvení je pak málo intenzivní, světlé či vybledlé. Na nevhodnost sanytru (tedy i černého střelného prachu) jako základu barevně hořících slož upozorňují již historické prameny. *Encyclopédie méthodique* z roku 1782 udává:

Síra a sanytr mají tak živý plamen, že tento absorbuje ihned flogiston těchto látek, a tím ničí barvu. Totéž platí pro hořlavé materiály, jako je papír, tkanina, tenké dřevěné hobliny, namočené ve směsi vytvořené půluncí salmiaku a stejného množství měděnky rozpuštěné ve sklenici octu, které dávají při hoření pěkný zelený plamen, ale které nejsou vůbec odolné vůči prudkému ohni ze sanytru a síry.⁴⁵

U. S. Naval ammunition depot.: Crane 1964, s. 5, 21, 12a; W. Meyerriecks – K. L. Kosanke, „Color values and spectra of the principal emitters in colored flames“, *J. Pyrotech.* 18, 2003, s. 719–720, T. Shimizu, *Fireworks, the art science and technique*, s. 60–61, J. A. Conkling, *Chemistry of pyrotechnics*, s. 144.

⁴⁴ Zeleně hořící ohněstrůjná slož, kterou objevili ruští ohněstrůjci Danilov s Martinovem v druhé polovině 18. století. Slož je založena na směsi měděnky s ethanolem a neobsahuje dusičnan draselný (S. Werrett, „Green is the colour: St. Petersburg’s chemical laboratories and competing visions of chemistry in the eighteenth century“, *Ambix* 60, 2013, s. 133; S. Werrett, *Fireworks – Pyrotechnic arts and sciences in European history*, The University of Chicago Press: Chicago 2010, s. 160–162).

⁴⁵ *Encyclopédie méthodique: Arts et métiers mécaniques*, Chez Panckoucke: Paris 1782, s. 119 (překlad z francouzského originálu Ondřej Němčák).

V podobném duchu o dusičnanu draselném píše Ruggieri:

Jelikož sanytr je dominantní ve složi, jeho oheň vždy kazí barvu ohně dalších hořlavých materiálů, které jsou s ním smíšeny.⁴⁶

Do třetice nemožnost dosažení kvalitního zeleného zbarvení složí s obsahem černého střelného prachu či sanytru potvrzuje i významná ohněstrůjná monografie Moritze Meyera z roku 1833:

Bohužel se nám téměř nepodařilo získat zelenou barvu podle předpisů, vyličených v řadě ohněstrůjných monografií a zmiňujících směsi jemné mědi s černým střelným prachem nebo dusičnanem draselným, sírou, surmou a měděnkou atd.⁴⁷

Až náhrada černého střelného prachu jako základu barevně hořících složí lihem (Ruský oheň) umožnila vytvořit kvalitní zeleně hořící slož. Při hoření lihu vzniká jen malé množství kondenzovaných částic emitujících záření černého tělesa a zároveň vzniká velké množství vodní páry (zdroj vodíku), která následnými reakcemi s mědí produkuje v dostatečném množství zeleně emitující CuOH.

Salmiak – chlorid amonný

V případě chloridu amonného popisují autoři historických ohněstrůjných monografií vznik žlutozeleného, nazelenalého až zeleného zbarvení plamene (tabulka 2). Toto zbarvení je dáno emisí amoniaku v žlutozelené části spektra s maximem při 563,5 a 567 nm. Ve žlutozelené oblasti emituje i částice NH₂, která vzniká při rozkladu amoniaku.⁴⁸

Síra a alkohol

K docílení modrého zbarvení plamene autoři historické ohněstrůjné literatury doporučují přídavek síry nebo alkoholu. Zdrojem modré emise u alkoholu je pak deexcitace elektronů v molekulových orbitalech CH a C₂ radikálů,⁴⁹ které vznikají

⁴⁶ C.-F. Ruggieri, *Principles of pyrotechnics*, s. 77 (překlad z anglického překladu Robert Matyáš).

⁴⁷ M. Meyer, *Die Feuerwerkerei in ihrer Anwendung auf Kunst, Wissenschaft und Gewerbe*, Johann Ambrosius Barth: Leipzig 1833, s. 34 (překlad z německého originálu Alois Matyáš).

⁴⁸ R. W. B. Pearse – A. G. Gaydon, *The identification of molecular spectra*, s. 178–179.

⁴⁹ P. T. Gilbert, „Nonmetals“, in: R. Mavrodineanu (ed.), *Analytical flame spectroscopy*, Macmillan and Co. Ltd.: London 1970, s. 214–215.

při hoření alkoholu. Toto záření je však málo intenzivní a lidské oko je vyhodnocuje jako mdlé namodralé zbarvení. Podstatně intenzivnější modré zbarvení plamene poskytuje hořící síra. Zdrojem zbarvení plamene je pak částice S_2 , která emituje v modrofialové oblasti viditelného spektra.⁵⁰ Síra však hoří velmi pomalu a plamen hořící síry je tak velmi málo objemný s malou svítivostí.

U obou plamen barvicích látek budou mít na celkové zbarvení plamene zásadní vliv další komponenty slože, především pak v daném období běžně používaný černý střelný prach, sanytr a další paliva. Tyto komponenty ale mají silně negativní vliv na modré zbarvení plamene, kdy i malá příměs zmíněných komponent značně či zcela zastíní modrý plamen obou látek. U směsi síra/sanytr tento jev popsal Ruggieri, který pro síru uvádí:

Když hoří, vytváří modrý plamen, vlastnost, kterou ztrácí, když hoří se sanytrem.⁵¹

Autorem tohoto článku provedený experiment se směsí S/KNO_3 tento názor potvrzuje, tmavě modrým plamenem hoří jen čistá síra, ve směsi s 10 % dusičnanu draselného se zbarvení mění na slabě namodralé. S růstem obsahu dusičnanu draselného ve směsi je pak namodralé zbarvení méně a méně zřetelné, až mizí zcela. Tento závěr je ve shodě s názorem Jonese,⁵² který uvádí, že v modře hořících složích na bázi síry musí být síra hlavní komponentou.

4. Souhrn

Zbarvení plamene ohněstrůjních složí, používaných v Evropě v průběhu 17., 18. a počátku 19. století, bylo z dnešního pohledu poměrně chudé. Hlavní barvou plamene byla bílá, žlutá, oranžová, popř. červená. Tyto barvy byly emitovány zářením černého tělesa pevných a kapalných zplodin hoření ohněstrůjních složí, jejichž základem byl černý střelný prach. Velká část plamen barvicích látek, uváděných historickou literaturou (především organické hořlaviny a nereaktivní minerály), ani netvořila žádné vlastní zářící částice, které by se podílely na zbarvení plamene, ale jen snižovala teplotu hoření slože, a tím posouvala polohu emisního maxima ve spektru od bílé ke žluté, oranžové až k červené. Ostatní základní barvy – zelená a modrá –,

⁵⁰ Tamtéž, s. 278–283.

⁵¹ C.-F. Ruggieri, *Principles of pyrotechnics*, s. 57 (překlad z anglického překladu Robert Matyáš).

⁵² R. Jones, *Artificial fire-works, improved to the modern practice from the minutest to the highest branches*, s. 64

kteřé vznikají emisí zářících částic z příslušných plamen barvicích látek (sloučeniny mědi, amonné soli, síra, líh), se v plamenu mohly projevit maximálně ve formě lehkého nádechu či odstínu. Hlavním důvodem bylo nevhodné používání černého střelného prachu jako základu ohněstrůjných složí, kdy silná emise záření černého tělesa kondenzovaných zplodin černého střelného prachu žádané zbarvení plamene vymyla.

Dle Werrettova názoru však dobový pozorovatel ohňostroju bez soudobých zkušeností vnímal barvy plamene jinak, než jak je vnímáme dnes my,⁵³ a i slabé odstíny do jednotlivých barev vnímal daleko intenzivněji. To také vysvětluje, proč autoři ohněstrůjné literatury popisují účinek jednotlivých plamen barvicích látek u obtížně dosažitelných barev (zelená, modrá) většinou bez kritických poznámek.

Posun v barevně hořících složích, konkrétně v zeleném zbarvení, nastal až ve druhé polovině 18. století objevem Ruského ohně a zavedením zinku a kyseliny borité v barevně hořících složích. Skutečnou revoluci v barevně hořících složích ale umožnil až objev a následné zavedení chlorečnanu draselného a sloučenin barya a stroncia v ohněstrůjných složích, k čemuž došlo v prvních desetiletích 19. století. Tyto nové látky byly schopny poskytnout daleko čistější a intenzivnější zbarvení plamene na úrovni současných ohněstrůjných složí. Díky tomu v první polovině 19. století z ohněstrůjných složí postupně mizí téměř všechny barvotvorné látky používané během 17., 18. a počátku 19. století.

Poděkování

Autor by rád poděkoval Martinu Künzelovi za výpočet teplot hoření pomocí termochemického kódu *Explo5* a Haně Stoklasové, Ondřeji Němčákovi a Aloisi Matyášovi za překlady pasáží z původních pramenů.

⁵³ S. Werrett, *Early Sci. Med.*, s 462.

Summary

The range of colours in the flames of European fireworks used during the 17th, 18th and early 19th centuries was somewhat limited compared with what we see today. The main colours of the flame were white, yellow, orange, and red. These colours were produced by the black-body radiation of solid and liquid combustion products of the firework mixtures, the basis of which was black powder. Much of the flame-colouring agents mentioned in historical literature (especially organic combustibles and non-reactive minerals) did not themselves form any colour generating species likely to contribute to the colour of the flame, but simply lowered the combustion temperature of the mixture, thus shifting the emission maximum in the spectrum from white to yellow and orange through to red. At best, other basic colours – green and blue, i.e. colours that are formed by the emission of atoms and molecules from the relevant flame-colouring agents (copper compounds, ammonium salts, sulphur, and alcohol) – could have appeared in the flame in the form of a slight tinge or shade. The main reason was an inappropriate use of black powder as the basis for firework mixtures, when the strong black-body radiation from its condensed combustion products masked the desired colour of the flame.

The historical observer of fireworks, lacking today's experience, would have perceived the colours of the flame differently from how we perceive them today, and he would have seen even the faint shades of the individual colours much more intensely. This also explains why authors of historical fireworks books describe the effect of difficult-to-achieve colours (green, blue) from individual flame-colouring agents without any self-deprecating or critical remarks.

The shift in the coloured flame composition, particularly for green, occurred in the second half of the 18th century when the Russian fire was discovered and zinc and boric acid were introduced in coloured flame compositions. However, the real revolution in coloured flame firework compositions occurred with the introduction of potassium chlorate and barium and strontium compounds in fireworks mixtures, which took place early in the 19th century. These new substances were able to provide a more intense flame colour with higher purity similar to that achieved in the fireworks compositions nowadays. As a result, by the middle of the 19th century, almost all colouring agents used during the 17th, 18th and early 19th centuries had gradually disappeared from firework mixtures.

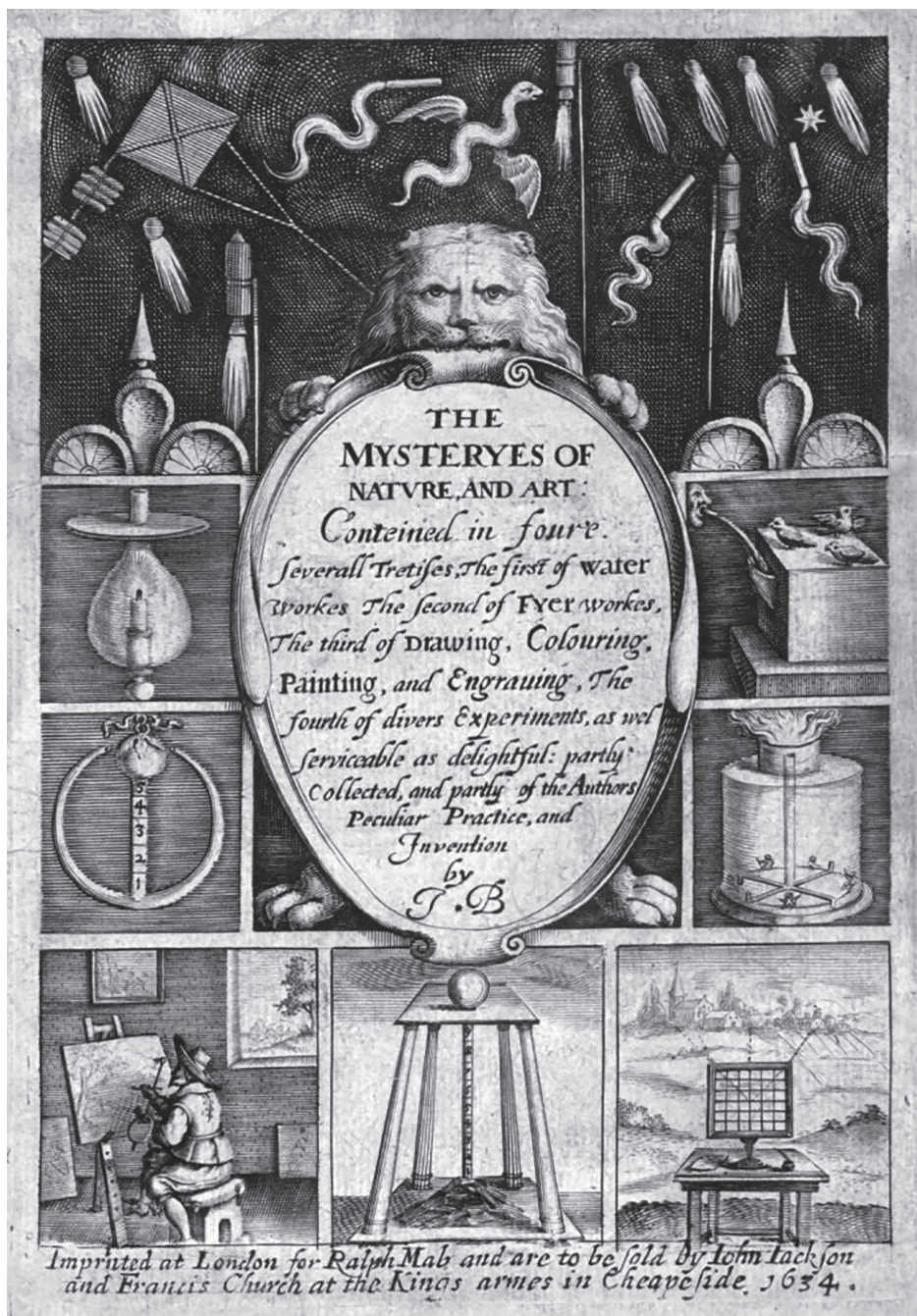
Correspondence

doc. Ing. Robert Matyáš, Ph.D.

Ústav energetických materiálů, Univerzita Pardubice

Studentská 95, 532 10 Pardubice

robert.matyas@upce.cz



Obr. 1. John Bate, *The Mysteries of Nature and Art*, Thomas Harper: London 1634, titulní strana.



Obr. 2. Příklad jednoho ze způsobů sestavení zábavného ohňostroje na lodi. Lorrain Hanzelet, *La pyrotechnie*, Par I. & Gaspard Bernard: Au Pont-à-Mousson 1630, s. 253 (převzato z <https://archive.org/details/lapyrotechniedeh00appi>).