

## DETEKCE VÝBUŠNIN POMOCÍ PŘENOSNÉHO NEUTRONOVÉHO GENERÁTORU

## DETECTION OF EXPLOSIVES USING A PORTABLE NEUTRON GENERATOR

Petr Alexa<sup>a\*</sup>, Radim Uhlář<sup>a</sup><sup>a</sup> Katedra fyziky, FEI VŠB-TUO, 17. listopadu 2174/15, 708 00 Ostrava, Česká republika

\* Korespondující autor. e-mail: petr.alex@vsb.cz, tel.: +420 607 683 702

## Abstrakt

Přenosný fúzní neutronový generátor MP320 emituje rychlé neutrony o energii 14 MeV. Tyto neutrony umožňují nedestruktivní detekci lehkých prvků (C, N, O, Cl), které jsou součástí výbušnin. Scintilačním nebo polovodičovým spektrometrem se detekuje promptní nebo zpožděné charakteristické gama záření emitované jádru lehkých prvků. Promptní měření je časově náročnější (cca 30 – 60 min) a méně citlivé vzhledem k vyššímu pozadí při zapnutém neutronovém generátoru. Měření zpožděného gama záření, vhodné zejména pro detekci N a Cl, je rychlejší (cca 5-10 min ozařování a 10 minut měření) a citlivější (při použití studnového polovodičového spektrometru detekce min. 0,5 g N).

**Klíčová slova:** detekce výbušnin, rychlé neutrony, gama záření

## Abstract

Portable fusion neutron generator MP320 emits 14 MeV fast neutrons that enable non-destructive detection of light-elemental explosives constituents (C, N, O, Cl). A scintillation or semiconductor spectrometer detects prompt or delayed characteristic gamma radiation emitted by the irradiated light nuclei. The prompt measurement is more time-consuming (approx. 30 – 60 min) and less sensitive due to a higher background caused by the running generator while the delayed measurement, suitable especially for N and Cl detection, is faster (approx. 5 – 10 min irradiation and 10 min measurement) and more sensitive (using a semiconductor well spectrometer the detection limit reaches 0.5 g of N).

**Key words:** explosives detection, fast neutrons, gamma radiation

## 1. ÚVOD

Mezi zavedené metody detekce výbušnin patří využití cvičených psů, ultrastopová detekce, rentgenové záření, magnetická a kvadrupolová rezonance nebo terahertzová spektrometrie. Každá z metod má své silné stránky i slabiny. Metoda detekce výbušnin, která využívá rychlé neutrony o energii 14 MeV, je založena na ozáření zkoumaného vzorku rychlými neutrony, které mají vysokou pronikavou schopnost (např. železo tloušťky 9 cm zeslabí svazek neutronů pouze na polovinu). Neutrony ve zkoumaném vzorku vyvolávají jaderné reakce, které jsou doprovázeny emisí promptního a zpožděného pronikavého gama záření. Toto záření pronikne i případným kovovým stíněním, ve kterém je umístěn zkoumaný vzorek. Samotná detekce je

založena na měření charakteristického gama záření, které doprovází výskyt prvků obsažených ve výbušninách, tj. kyslíku a uhlíku, případně i dusíku a chlóru.

V České republice se v současné době tato metoda v bezpečnostní praxi nevyužívá. Ve světě, především v USA, existuje rozsáhlý výzkum, který se zabývá využitím rychlých neutronů pro detekci výbušnin, a objevují se už i první komerční systémy, které využívají rychlé neutrony (např. Rapiscan Vehicle Explosive Detection System firmy Rapiscan Systems – An OSI Systems Company) [1]. Oproti těmto systémům, které využívají k detekci výbušnin promptní gama záření, se navržená metoda zaměřuje rovněž na detekci zpožděného gama záření po ozáření dusíku, kyslíku a chlóru. Výhoda detekce zpožděného gama záření spočívá především ve vyšší citlivosti na přítomnost uvedených prvků, protože měření probíhá při vypnutém neutronovém generátoru (zdroji rychlých neutronů o energii 14 MeV), kdy je pozadí gama záření výrazně nižší než při zapnutém neutronovém generátoru.

## 2. POPIS METODY

Výbušniny jsou detekovány na základě empirického pozorování, podle kterého je hustota kyslíku ve výbušnině vyšší než hustota uhlíku, samotná hustota kyslíku je vyšší než  $0,6 \text{ g cm}^{-3}$  a hustota kyslíku a uhlíku vyšší než  $0,95 \text{ g cm}^{-3}$ . Pro výbušniny obsahující dusík navíc platí, že poměr hustoty kyslíku a dusíku je nižší než 5 a zároveň vyšší než poměr hustoty uhlíku a dusíku [2]. Zdrojem neutronů je přenosný fúzní neutronový generátor MP320 firmy ThermoPhysics, ve kterém se neutrony produkují při interakci deuteria a tritia (DT-neutronový generátor). Gama záření, které doprovází interakce neutronů ve zkoumaném vzorku, se měří vhodným spektrometrem gama záření, např. germániovým polovodičovým spektrometrem (HPGe) nebo scintilačním NaI(Tl) spektrometrem. Metoda byla testována na nízkopozadovém studnovém polovodičovém HPGe spektrometru GWD-3023 firmy Baltic Scientific Instruments, koaxiálním polovodičovém HPGe spektrometru GC-3018 firmy Canberra a na velkoobjemovém scintilačním NaI(Tl) spektrometru firmy Scionix s krystalem o rozměrech 3" x 5" x 15".

### 2.1 Zpožděné gama záření – detekce dusíku, chlóru a kyslíku

Množství dusíku ve vzorku se stanoví na základě měření zpožděných anihilačních fotonů gama záření o energii 511 keV doplněné o kontrolu poločasu přeměny aktivovaného izotopu  $^{13}\text{N}$ . Neutrony o energii 14 MeV emitované DT-neutronovým generátorem iniciují reakci  $^{14}\text{N}(n,2n)$ , jejímž produktem je pozitronový zářič  $^{13}\text{N}$  s poločasem přeměny 9,965 min. Pozitrony anihilují s elektrony ve vzorku, v jeho obalu, případně i v detektoru. Pozorovaný počet anihilačních gama kvant je přímo úměrný počtu jader  $^{14}\text{N}$ , a tedy i počtu atomů dusíku ve vzorku. Pro kalibraci se používá vhodný etalon o známé hmotnosti dusíku (např. melamin nebo močovina). Doporučená doba ozařování je 5 – 10 min. Měření spektra gama záření probíhá po dobu 10 min s tím, že se zaznamenají spektra získaná po 5 a po 10 minutách. Poměr ploch píků gama záření o energii 511 keV v těchto spektrech umožní spolu s analýzou dalších případných píků odhalit příměsi dalších prvků, které po ozáření neutrony produkují anihilační gama záření. Kontrola stálosti neutronového toku se provádí pomocí aktivace měděných fólií a následného cca 5 min měření anihilačních gama kvant scintilačním spektrometrem.

Pro stanovení chlóru se využívá izotop  $^{37}\text{Cl}$ , který tvoří 24,23% přírodního chlóru, konkrétně reakce  $^{37}\text{Cl}(n,p)$ , ve které vzniká radioizotop  $^{37}\text{S}$  s poločasem přeměny 5,05 min, který se  $\beta^-$  rozpadem rozpadá do excitovaného stavu  $^{37}\text{Cl}$  s emisí charakteristického gama záření o energii 3103 keV s pravděpodobností  $(93,9 \pm 0,6) \%$ . Na rozdíl od stanovení obsahu dusíku, zde není

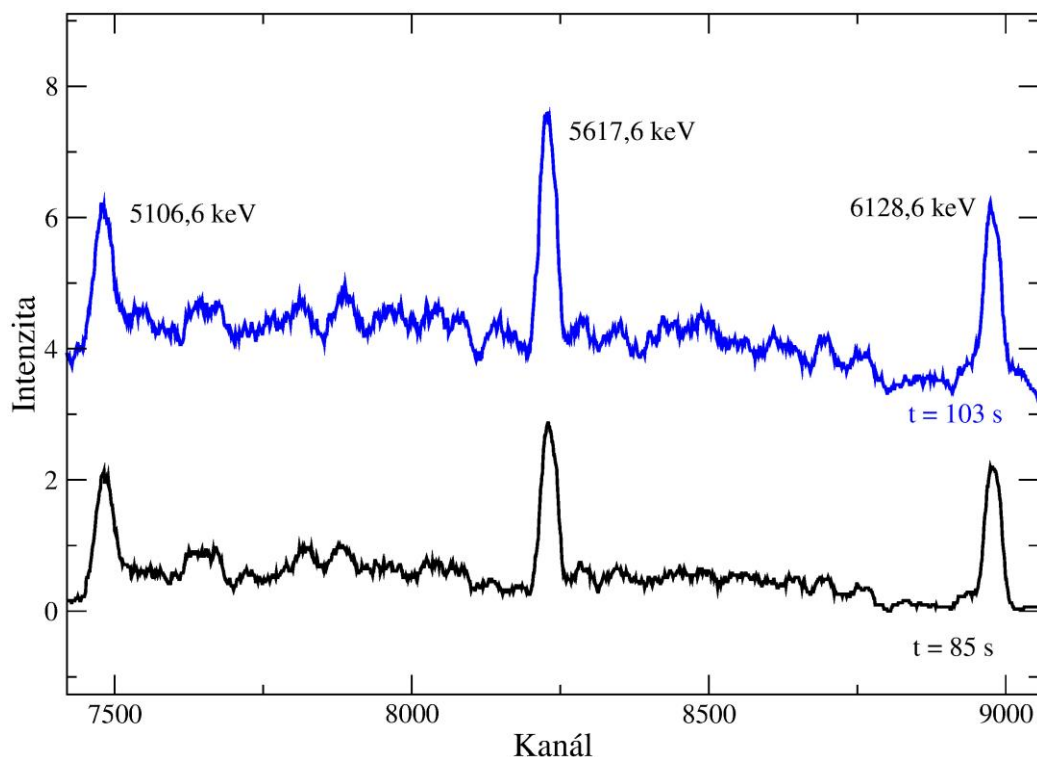
nutné provádět kontrolu poločasu přeměny a stačí provést ozařování po dobu cca 5 – 10 min a měření charakteristického gama záření opět po dobu cca 5 – 10 min.

Pro stanovení kyslíku se využívá reakce  $^{16}\text{O}(n,p)$ , ve které vzniká radioizotop  $^{16}\text{N}$  s poločasem přeměny 7,13 s, který se  $\beta^-$  rozpadem rozpadá do excitovaného stavu  $^{16}\text{O}$  s emisí charakteristického gama záření o energii 6128,6 keV s pravděpodobností  $(67,0 \pm 0,6) \%$ . Samotné ozařování a měření charakteristického gama záření probíhá v tomto případě kvůli krátkému poločasu přeměny cyklickým způsobem: Vzorek nebo etalon zůstávají v zafixované vzdálenosti od neutronového generátoru (cca 50 cm) na spektrometru gama záření, který je odstíněn od přímého svazku neutronů železným stíněním o tloušťce cca 30 cm. Neutronový generátor pracuje v tzv. režimu “slow pulsing”, kdy ozařování probíhá po dobu např. 15 s a po dobu dalších 15 s je generátor vypnutý. V době, kdy je generátor vypnutý, probíhá měření charakteristického gama záření (příklad pozorovaných spekter viz obr. 1).

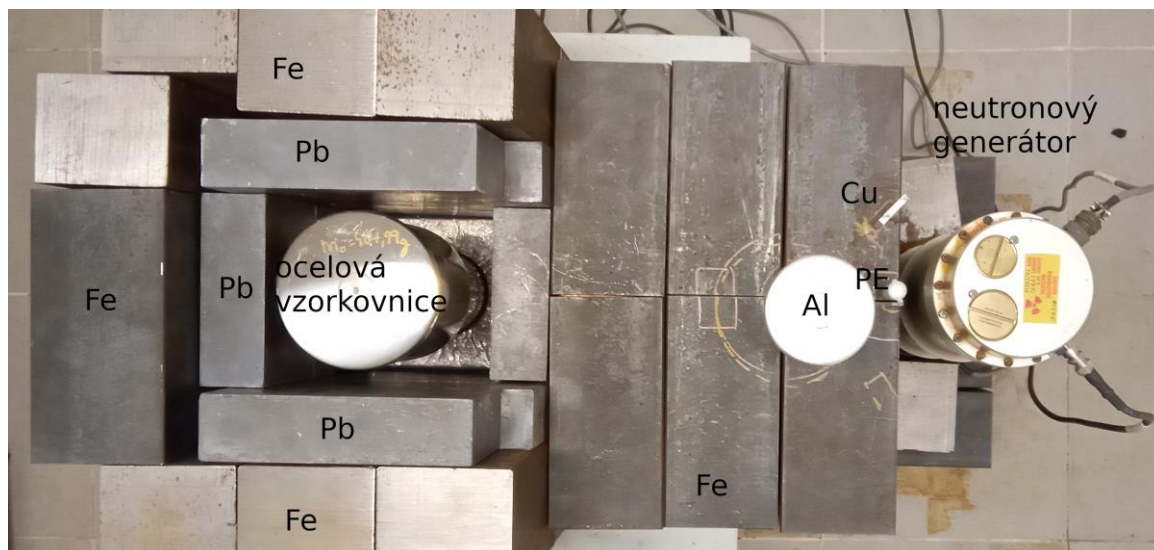
## 2.2 Promptní gama záření – detekce kyslíku, dusíku a uhlíku

Toto měření probíhá při zapnutém neutronovém generátoru v kontinuálním režimu. HPGe spektrometr gama záření je odstíněn minimálně 30 cm železa od přímého svazku neutronů a zkoumaný vzorek je umístěn na spektrometru gama záření na konci ozařovacího kanálu. Pro další snížení pozadí byl spektrometr gama záření vyjma otvoru pro vstup neutronového svazku odstíněn kombinovaným stíněním tvořeným 5 cm olova a 10 cm železa [3].

*Obrázek 1: Naměřená spektra zpožděného gama záření z aktivovaného kyslíku pro vodu s píky totální absorpce (6128,6 keV) a jedno- (5617,6 keV) a dvou-fotonovými (5106,6 keV) únikovými píky pro dva časy měření. Pro redukci šumu jsou zobrazeny v každém kanálu vždy střední hodnoty přes 30 sousedních kanálů. Spektra jsou vůči sobě uměle posunuta, aby byl zřetelný jejich průběh.*



Obrázek 2: Fotografie použitého experimentálního uspořádání (pohled shora) s neutronovým generátorem, stíněním ze železa (Fe) a olova (Pb) a umístěním testovacích měděných fólií (Cu) a jednotlivých vzorkovnic: ocelová vzorkovnice pro měření promptního gama záření na HPGe GC-3018 spektrometru, hliníková (Al) a polyetylénová (PE) vzorkovnice pro měření zpožděného gama záření v blízkosti neutronového generátoru.



Pro detekci kyslíku, dusíku a uhlíku se využívá nepružný rozptyl rychlých neutronů, konkrétně tyto interakce:

(a)  $^{16}\text{O}(n,n')$  s emisí gama záření o energii 6128,6 keV, která se ve spektru projeví trojicí píků totální absorpce, jedno a dvoufotonového únikového píku (6128,6 keV, 5617,6 keV, 5106,6 keV),

(b)  $^{14}\text{N}(n,n')$  s emisí gama záření o energii 5104,9 keV, velmi blízké energii dvoufotonového únikového píku kyslíku,

(c)  $^{12}\text{C}(n,n')$  s emisí gama záření o energii 4438,9 keV. Gama záření o stejné energii dává i interakce  $^{16}\text{O}(n,n'\alpha)$  a gama záření o velmi blízké energii 4445,0 keV také interakce  $^{14}\text{N}(n,\alpha)$ . Obě dvě interakce ale mají nižší účinný průřez, a tedy i menší pravděpodobnost.

### 3. VÝSLEDKY A SHRNUTÍ

Metoda stanovení dusíku na základě měření zpožděných anihilačních fotonů byla testována se vzorky močoviny a melaminu v hliníkových válcových vzorkovnicích o objemu 515 ml a tloušťce stěn 1,5 mm. Emisní četnost neutronového generátoru byla zvolena  $10^8$  neutronů/s do celého prostoru. Měření pomocí scintilačního velkoobjemového NaI(Tl) spektrometru s krystalem o rozměrech 3" x 5" x 15" bez stínění umožnilo stanovit hmotnost dusíku ve vzorku melaminu (282 g) s přesností cca 4%. Během 10 min měření dostáváme cca 270 pulzů/g dusíku v anihilačním píku, lze tedy stanovit hmotnosti dusíku řádově v desítkách gramů. Vzhledem k tomu, že scintilační spektrometr nebyl odstíněn, je možné využití i v terénních podmínkách.

Dosažení ještě větší citlivosti umožňuje využití nízkopozadového studnového HPGe spektrometru GWD-3023 (Baltic Scientific Instruments) v masivním stínění (8 cm Pb + 2 cm staré Pb + 8 mm Cu). Testovány byly vzorky močoviny, melaminu a dusičnanu amonného v polyetylénových vzorkovnicích o objemu 5,5 ml umístěných ve studni spektrometru. V tomto

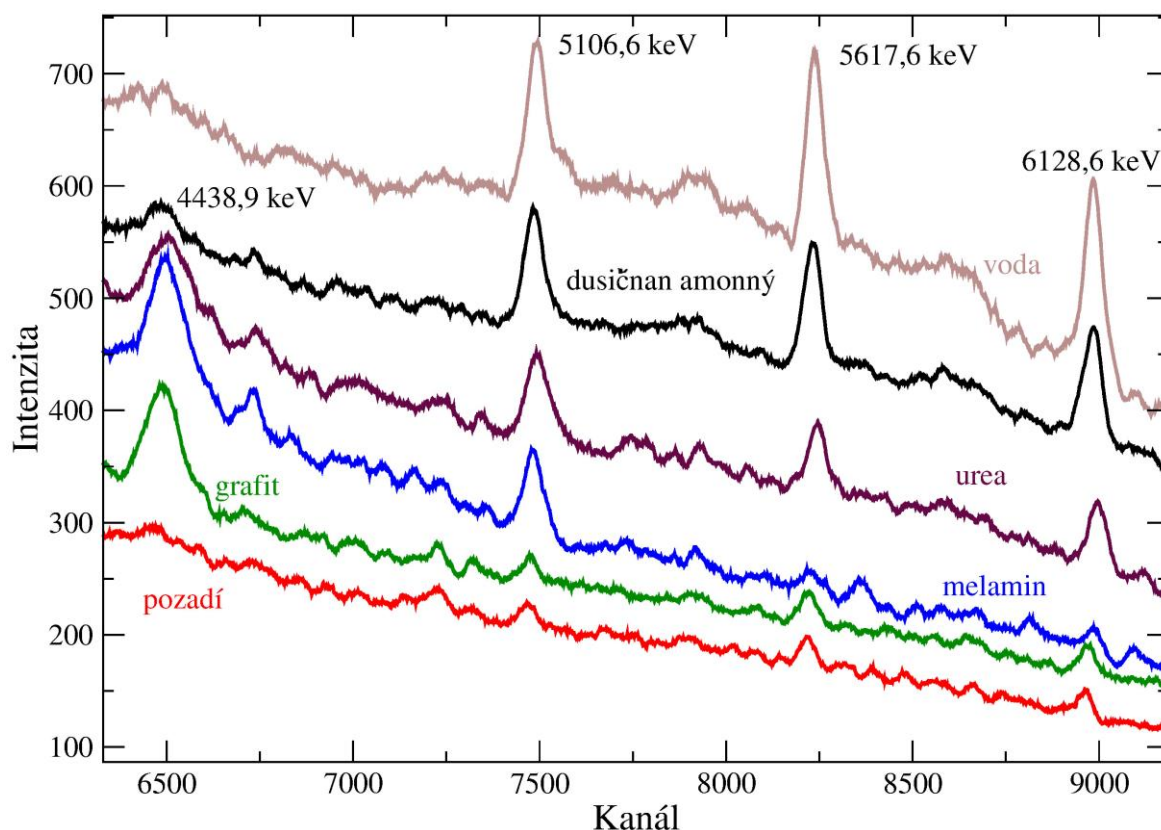
případě dostáváme během 10 min měření cca 800 pulzů/g dusíku a lze stanovit hmotnosti až na úrovni 0,5 g, ale použití je možné pouze v laboratoři.

Metoda stanovení chlóru byla testována rovněž s využitím spektrometru GWD-3023 se vzorky NaCl a KCl v polyetylenových vzorkovnicích. Během 10 min měření dostáváme cca 55 pulzů/g chlóru, lze tedy takto stanovit hmotnosti na úrovni cca 10 g.

Metoda stanovení kyslíku na základě měření zpožděných anihilačních fotonů byla testována na vzorku vody v ocelové vzorkovnici o objemu 685 ml a tloušťce stěn 1 mm s emisní četností neutronového generátoru  $10^8$  neutronů/s do celého prostoru. Měření pomocí koaxiálního HPGe spektrometru GC-3018 (Canberra) ve stínění (5 cm Pb + odstínění primárního neutronového svazku 30 cm Fe) dávalo v průměru ( $0,00223 \pm 0,00018$ ) pulzů/s na 1 g kyslíku. Na základě tohoto údaje můžeme odhadnout potřebnou dobu měření v závislosti na odhadované hmotnosti kyslíku ve zkoumaném vzorku pro dosažení alespoň 10% relativní rozšířené nejistoty, která odpovídá cca 200 pulzům. Je zřejmé, že tato metoda v reálném čase umožňuje stanovení kyslíku pouze ve vzorcích o hmotnostech řádově stovky gramů.

Stanovení kyslíku, dusíku a uhlíku na základě měření promptního gama záření bylo testováno na vzorcích vody, močoviny, melaminu, grafitu a dusičnanu amonného ve stejných ocelových vzorkovnicích a za stejných podmínek jako stanovení kyslíku v předchozím případě. Pro detekci fotonů byl použit HPGe spektrometr GC-3018 (Canberra) ve stínění 5 cm Pb + 10 cm Fe + odstínění primárního neutronového svazku 30 cm Fe. Střed ocelové vzorkovnice se vzorky byl umístěn na HPGe spektrometru ve vzdálenosti 50 cm od terčíku neutronového generátoru. Typický průběh spekter získaných ve 30min měřeních je uveden na obr. 3. I zběžný pohled na naměřená spektra umožňuje odhalit, že voda a dusičnan amonný neobsahují uhlík, močovina obsahuje všechny tři prvky, melamin neobsahuje kyslík a grafit neobsahuje dusík a kyslík. Stanovení uhlíku a kyslíku o hmotnostech stovky gramů je možné s přesností cca 10%, stanovení dusíku je méně přesné vzhledem k nutnosti odseparování příspěvku od kyslíku do píku 5104,9 keV.

*Obrázek 3: Naměřená spektra pozadí, grafitu, melaminu, močoviny (urea), dusičnanu amonného a vody s vyznačením charakteristických píků indikujících přítomnost uhlíku, dusíku a kyslíku. Pro redukci šumu jsou zobrazeny v každém kanálu vždy střední hodnoty přes 30 sousedních kanálů. Spektra jsou vůči sobě uměle posunuta, aby byl zřetelný jejich průběh.*



### Poděkování

Výzkum byl podpořen z projektu Bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra ČR Využití radiačních metod pro detekci a identifikaci CBRNE materiálů (VI20192022171).

### Použitá literatura

- [1] GOZANI T.: Detection of Explosives and Other Threats Using Accelerator-Based Neutron Techniques, In: Hellborg, R.: *Electrostatic Accelerators. Particle Acceleration and Detection*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 445-460, 2005.
- [2] KUZNETSOV A.V., OSETROV O.I.: Detection of Improvised Explosives and Explosive Devices, MP-SET-117-14.pdf, NATO – Science and Technology Organization meeting *Prediction and Detection of Improvised Explosive Devices*, 2007.
- [3] UHLÁŘ R., ALEXA P.: An Optimized D-T neutron Generator Shielding for Prompt Gamma Ray Neutron Activation Analysis of Light Elements. In *Eur. Phys. J. Web of Conf.*, vol. 261, 02003, 2022