

dr inż. Maciej MISZCZAK
dr inż. Eugeniusz MILEWSKI
mjr mgr inż. Wojciech GORYCA
mgr inż. Marek PIECUCH
dr inż. Henryk TERENOWSKI
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

ANALIZA METOD BADANIA I OCENY FIZYKOCHEMICZNEJ STAŁOŚCI INICJUJĄCYCH MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH

W artykule przedstawiono analizę w zakresie metod badania i oceny fizykochemicznej stałości inicjujących materiałów wybuchowych, takich jak piorunian rtęci, azydek ołowiu, trójnitrorezorcynian ołowiu i tetrazen, stosowanych w inicjatorach działania środków bojowych. Analizy tej dokonano na podstawie dostępnych źródeł naukowo-technicznych, ze szczególnym uwzględnieniem wojskowej dokumentacji normalizacyjnej NATO i USA.

1. Wstęp

Począwszy od połowy XX. wieku do chwili obecnej bardzo popularnymi metodami stosowanymi do badania fizykochemicznej stałości inicjujących materiałów wybuchowych są: metody manometryczne, w tym metoda próżniowa (VST- Vacuum Stability Test), za pomocą której mierzona jest ilość (opcjonalnie objętość i/lub ciśnienie) gazowych produktów rozkładu inicjujących materiałów wybuchowych, wydzielonych w wyniku ich termicznego rozkładu w temperaturze 100 °C lub 120 °C w ciągu 40 h lub 48 h ogrzewania, metoda pomiaru ubytku masy inicjujących materiałów wybuchowych w temperaturze 75 °C lub 100 °C po 48 h lub 96 h ogrzewania (termostatowania), badania na wyfuknięcie (zapalenie i/lub wybuch) mierzące zakres temperatur tego rodzaju zjawisk lub mierzące czas indukcji, tj. czas po którym nastąpią ww. zjawiska od chwili, gdy próbka materiału wybuchowego znajdzie się w komorze grzewczej o ustalonej temperaturze, długotrwałe, cieplne badania przechowywaniem, polegające na termostatowaniu inicjujących materiałów wybuchowych w ustalonej, stosunkowo niskiej temperaturze, zazwyczaj z zakresu 50-80 °C przez co najmniej kilka, kilkanaście tygodni lub miesięcy albo kilka lat, aby osiągnąć warunki przyspieszonego starzenia jak najbliższe warunkom naturalnego przechowywania, różnicowa analiza termiczna (DTA - Differential Thermal Analysis), często z jednoczesnym pomiarem termogravimetrycznym (TGA – Thermogravimetric Analysis) oraz różnicowa kalorymetria skaningowa (DSC – Differential Scanning Calorimetry), zazwyczaj mierzące temperaturę początku rozkładu badanego materiału.

Aktualnie, metody manometryczne, w tym metoda VST i metoda pomiaru ubytku masy nie są zalecane do stosowania w zakresie badania fizykochemicznej stałości inicjujących materiałów wybuchowych w świetle normalizacyjnej dokumentacji NATO [1-2], ze względu na niepełną adekwatność mierzonych parametrów, jakimi są: objętości gazowych produktów reakcji rozkładu i proporcjonalny do tej objętości ubytek masy materiału, w odniesieniu do pomiaru i oceny stałości. Często okazuje się, że ilość gazowych produktów rozkładu powstających podczas ogrzewania inicjujących materiałów wybuchowych, a zatem ubytek ich masy nie

zawsze odpowiada rzeczywistemu rozkładowi tych materiałów. Ponadto, ilość wydzielonych substancji gazowych i odpowiadające im ubytki masy są tak znikome w przyjętych warunkach przyspieszonego starzenia dla wielu inicjujących materiałów wybuchowych, że pomiary tych parametrów wykonywane są ze stosunkowo dużym błędem. Zamiast ww. metod, normalizacyjna literatura NATO [1,2] zaleca stosowanie metod DTA, TGA i DSC w zakresie badania termicznej stałości inicjujących materiałów wybuchowych. Reszta ww. metod, tj. metody na wyfuknięcie oraz długotrwałe badania przechowywaniem traktowane są jako metody pomocnicze, lecz bardzo ważne i przydatne do rozwijania i uzupełniania wiedzy na temat fizykochemicznej stałości tej grupy materiałów, zwłaszcza w odniesieniu do kinetyki i mechanizmów ich termicznego rozkładu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy metod badania i oceny stałości inicjujących materiałów wybuchowych wypracowano oraz wyciągnięto wnioski w zakresie przydatności tych metod ze szczególnym uwzględnieniem możliwości ich implementacji, zwłaszcza metod NATO - w Siłach Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej.

2. Metody manometryczne oraz metody pomiaru ubytku masy w zakresie badania fizykochemicznej stałości inicjujących materiałów wybuchowych

Badania stałości fizykochemicznej inicjujących materiałów wybuchowych za pomocą metod VST i ubytku masy opisane są w pozycjach literaturowych [3-11].

Z danych tych wynika, że piorunian rtęci podczas ogrzewania w temperaturze 100 °C lub 120 °C przez 40 h lub 48 h wybucha, „nie wytrzymując” niniejszych prób termicznych. W wyniku ogrzewania w 100 °C przez 40 h tetrazen wydziela ponad 5 ml gazowych produktów rozkładu w przeliczeniu na 1 g swej masy [9]. Trojnitrorezorcynian ołowiu podczas ogrzewania w warunkach VST, tj. w 100 °C lub 120 °C, po 40 h ogrzewania wydziela w obu przypadkach po 0,4 ml gazowych produktów rozkładu, zaś azydek ołowiu odpowiednio 0,32 ml i 0,46 ml w przeliczeniu na 1 g. W tym miejscu warto poruszyć problem ustalenia masy badanej próbki inicjujących materiałów wybuchowych w zakresie metody VST. Według amerykańskich źródeł literaturowych [3,4,6] masa ta wynosi 0,2 g [4] lub 1,0 g [3,6], zaś według STANAG-u 4556 [5] masa badanego inicjującego materiału wybuchowego powinna mieścić się w przedziale 0,2-0,5 g. Również nie są ostatecznie ustalone kryteria oceny fizykochemicznej stałości inicjujących materiałów wybuchowych na podstawie dopuszczalnych objętości gazowych produktów ich termicznego rozkładu. Według dokumentu normalizacyjnego marynarki wojennej USA [4], dopuszczalna objętość gazowych produktów rozkładu inicjującego materiału wybuchowego, zachodzącego w temperaturze 100 °C przez 48 h, wynosi 2,0 ml w przeliczeniu na 1 g masy badanej próbki, przy czym podczas niniejszego rozkładu nie powinny się tworzyć wrażliwe (łatwo wybuchające) związki chemiczne. Z kolei według chińskich doniesień literaturowych [10], powołujących się na dane amerykańskie, objętość graniczna, na podstawie której uznaje się badany inicjujący materiał wybuchowy jako stabilny w warunkach VST, ma wartość 1,0 ml w przeliczeniu na 1 g próbki. Również do oceny stałości inicjujących materiałów wybuchowych za pomocą VST, przyjęto w indyjskiej pozycji literaturowej [9] wartość graniczną objętości gazowych produktów wynoszącą 1,0 ml w przeliczeniu na 1 g próbki.

A zatem, według dotychczas przedstawionych danych literaturowych najbardziej stały/trwały termicznie jest azydek ołowiu i trójnitrorezorcynian ołowiu, oznaki niestałości termicznej wykazuje tetrazen, zaś piorunian rtęci wykazuje najmniejszą stałość termiczną. Wyjątkowo duża stałość termiczna azydku ołowiu została potwierdzona w bardzo ostrych warunkach przyspieszonego starzenia tj. w stosunkowo wysokiej temperaturze wynoszącej 230 °C przez

48 h, za pomocą VST [11]. W wyniku ogrzewania w powyższych warunkach azydek ołowiu wydzielił około 7,7 ml gazowych produktów rozkładu w przeliczeniu na 1 g swej masy, co odpowiadało około 11,1 % rozkładu jego masy.

Wnioski na temat termicznej stałości ww. inicjujących materiałów wybuchowych potwierdzają cieplne, izotermiczne metody pomiaru ubytku masy, przeprowadzane w temperaturze 75 °C (w ramach badania o nazwie „International Test”) lub w 100 °C, w ramach t.zw. „100 °C Heat Test”. Czas trwania tych testów wynosi 48 h i 96 h.. W zbiorze i przewodniku wojskowych norm USA dotyczących materiałów wybuchowych stosowanych przez amerykańskie wojska lądowe [3] podano następujące wyniki pomiarów ubytków masy azydku ołowiu, piorunianu rtęci, trójnitrorezorcynianu ołowiu i tetrazenu za pomocą ww. izotermicznych metod ogrzewania w temperaturze 75 °C i 100 °C.

W wyniku termostatowania w 100 °C, azydek ołowiu wykazał ubytek masy wynoszący 0,34 % i 0,39 % odpowiednio po 48 h i 96 h ogrzewania. Piorunian rtęci wybuchał po około 16 h ogrzewania „nie wytrzymał” próby termostatowania. Trójnitrorezorcynian ołowiu wykazał stosunkowo duży ubytek masy, wynoszący po 1,5 % po 48 h i 96 h ogrzewania, natomiast ubytek masy tetrazenu był bardzo wysoki, ponieważ wynosił 23,2 % oraz 3,4 % odpowiednio po 48 h i 96 h ogrzewania. Znacznie mniejszy ubytek masy trójnitrorezorcynianu ołowiu podają inne źródła amerykańskie [7], według których ubytek ten wynosił 0,38 % i 0,76 % odpowiednio po 48 h i 96 h ogrzewania w 100 °C. Stosunkowo duże ubytki masy trójnitrorezorcynianu ołowiu, wynoszące po 1,5 % mogą być spowodowane usunięciem wody krystalicznej (dehydratacją) związanej z molekułą trójnitrorezorcynianu, której zawartość w ramach niniejszego hydratu może wynosić 3,84 %.

Następny etap badań polegał na poddaniu najmniej stabilnych termicznie inicjujących materiałów wybuchowych tj. piorunianu rtęci i tetrazenu, starzeniu w łagodniejszych warunkach izotermicznych, czyli w 75 °C przez 48 h. Ubytek masy piorunianu rtęci wynosił 0,18 %, a tetrazenu 0,5 %, wskazując na większą skłonność do termicznego rozkładu tetrazenu w niniejszej temperaturze w porównaniu z piorunianem rtęci. Według danych marynarki wojennej USA [4] dopuszczalna granica rozkładu inicjującego materiału wybuchowego powinna wynosić 0,1 % początkowej masy badanej próbki w wyniku ogrzewania w temperaturze 100 °C przez 48 h. Wydaje się, iż wielkość ta jest zbyt niska, biorąc pod uwagę, że dopuszczalny ubytek masy dla kruszących materiałów wybuchowych, bardzo wytrzymałych termicznie, w warunkach termostatowania w 75 °C przez 48 h wynosi 0,3 % [12]. Potwierdzeniem niniejszego przypuszczenia może być propozycja dopuszczalnej granicy rozkładu przyjęta dla rosyjskich przemysłowych materiałów wybuchowych, do których zaliczono piorunian rtęci, azydek ołowiu i trójnitrorezorcynian ołowiu, wynosząca 1 % masy początkowej materiału wybuchowego, mierzona za pomocą technik manometrycznych, podana w pozycji literaturowej [13] dotyczącej przemysłowych materiałów wybuchowych. Inne, współczesne rosyjskie źródło informacji [14] na temat badania termicznej stałości przemysłowych materiałów wybuchowych zaleca stosowanie manometrycznych metod oceny stałości, mierzących nie tylko ilość gazowych produktów rozkładu materiałów wybuchowych, lecz przede wszystkim szybkość (dynamikę) wzrostu ilości tych produktów w funkcji czasu ogrzewania. Powyżej prezentowana filozofia pomiaru i oceny stałości materiałów wybuchowych w Rosji jest kontynuacją wcześniej rozwijanych w byłym Związku Radzieckim metod manometrycznych [15] polegających na pomiarze ciśnienia za pomocą czujników membranowych i/lub objętości gazowych produktów pochodzących z rozkładu materiału wybuchowego o ustalonej masie (do 1 g), ogrzewanego w ustalonej temperaturze z zakresu 70-200 °C w atmosferze powietrza, w funkcji czasu ogrzewania wynoszącego maksymalnie 14 h. Według tych metod stałość materiału wybuchowego jest określana na podstawie przebiegu (zmian, w tym wartości maksymalnej) ciśnienia i/lub objętości gazowych produktów rozkładu, otrzymanego podczas ogrzewania

materiału wybuchowego lub na podstawie czasu, po jakim gazowe produkty rozkładu osiągną określoną (założoną) wartość ciśnienia i/lub objętości.

W zakresie zastosowania metody VST do badania stałości inicjujących materiałów wybuchowych pojawiają się pewne niespójności w ramach dokumentów normalizacyjnych NATO. Z jednej strony STANAG 4556 [5] przewiduje stosowanie metod VST do badania stałości inicjujących materiałów wybuchowych, zaś według STANAG-u 4170 [1] i AOP-7 [2] metody VST nie są odpowiednie do badania stałości tej grupy materiałów wybuchowych.

3. Metody analizy termicznej DTA, TGA i DSC, metody określające temperaturę zapłonu i/lub wybuchu (wyfuknięcia) oraz czas indukcji tych zjawisk a także izotermiczne metody długoterminowego przechowywania (starzenia) w aspekcie badania fizykochemicznej stałości inicjujących materiałów wybuchowych

Metody analizy termicznej DTA, TGA i DSC są bardzo przydatne do badania oraz oceny stałości inicjujących materiałów wybuchowych, ze względu na czułość pomiaru podstawowych parametrów przemian cieplnych (opcjonalnie z pomiarem zmian masowych) badanych substancji. W ramach tych przemian szczególnie należy wziąć pod uwagę przemiany fazowe, takie jak topnienie, parowanie, sublimacja, w tym przemiany powodujące zmiany struktury krystalicznej, zwłaszcza w zakresie temperatur eksploatacji badanych materiałów oraz ich rozkład termiczny, włącznie z temperaturą wyfuknięcia (zapłonu) i/lub wybuchu. Na przykład w byłej polskiej normie branżowej BN-76/6091-41 [16] dotyczącej badania stałości termicznej materiałów wybuchowych (a zatem również inicjujących materiałów wybuchowych) za pomocą metody DTA podano, iż parametrem charakteryzującym niniejszą stałość jest temperatura początku termicznego rozkładu materiału wybuchowego, określana na podstawie punktu krzywej DTA, od którego rozpoczyna się szybkość wzrostu temperatury badanej próbki wynosząca co najmniej 3 °C/min względem linii bazowej termogramu DTA. Bardzo bogatym i wartościowym źródłem informacji w ww. zakresie jest STANAG 4515 [17]. Przydatność metod DTA, TGA i DSC w zakresie badania stałości przemysłowych materiałów wybuchowych potwierdzają również ww. współczesne rosyjskie źródła literaturowe [14].

W ramach standaryzacyjnych badań i oceny stałości inicjujących materiałów wybuchowych, metody DTA, TGA i DSC powinny umożliwić charakterystykę termiczną tych materiałów [1,2] uwzględniając ww. zjawiska fizykochemiczne towarzyszące przemianom cieplnym i/lub masowym zachodzącym w badanych substancjach. Niestety, w zakresie badań fizykochemicznej stałości nie są podane wyraźne standardowe kryteria jej oceny.

Innym, nie mniej istotnym źródłem wiedzy charakteryzującym stałość inicjujących materiałów wybuchowych są metody określające temperaturę zapłonu i/lub wybuchu (wyfuknięcia) oraz czas indukcji tych zjawisk a także izotermiczne metody długoterminowego ich przechowywania (starzenia) bardzo przydatne do badania kinetyki i mechanizmu rozkładu, zwłaszcza powolnego rozkładu termicznego w warunkach maksymalnie zbliżonych do warunków naturalnych.

Stosując niniejsze metody, zaobserwowano, że piorunian rtęci zaczyna ulegać widocznemu, mierzalnemu rozkładowi już w temperaturze 50 °C [13, 18-20], zaś w przedziale temperatur 140-160 °C oraz w wyższych temperaturach prawdopodobieństwo zaistnienia jego samozapłonu i/lub wybuchu (wyfuknięcia) wyraźnie wzrasta [3, 21]. Temperatura wybuchu piorunianu rtęci w ciągu 5 s od chwili jego ogrzewania w niej wynosi 210 °C [3]. Tetrazen zaczyna rozkładać się w widoczny sposób w temperaturze 50 °C lub 60 °C [22,23]. Podobnie jak piorunian rtęci, tetrazen “nie wytrzymuje” ogrzewania w temperaturze 75 °C [24] i 80 °C

[25] dłużej niż 8-9 dni, ponieważ po tym czasie termostatowania zaczyna rozkładać się znacznie szybciej niż przed upływem ww. czasu indukcji. W przedziale temperatur 130–160 °C tetrazen łatwo zapala się i/lub wybucha [3, 9, 26, 27]. Temperatura wybuchu tetrazenu w ciągu 5 s od chwili jego ogrzewania w niej wynosi 160 °C [3]. Trójnitrorezorcynian ołowiu traci wyraźnie masę w dosyć istotnym stopniu począwszy od temperatury 100 °C (również z powodu dehydratacji). Jego szybkość rozkładu znacznie wzrasta w zakresie temperatur od 130 °C to 240 °C [3, 28]. Temperatura wybuchu trójnitrorezorcynianu ołowiu w ciągu 5 s od chwili jego ogrzewania w niej wynosi 282 °C [3], lecz jego temperatura zapłonu/wybuchu według STANAG-u 4491 [29] wynosi 269 °C przy szybkości ogrzewania 5 °C/min. Azydek ołowiu posiada wyjątkowo wysoką stałość termiczną, ponieważ pierwsze oznaki jego rozkładu rozpoczynają się dopiero od około 200 °C [13, 21, 30]. Temperatura wybuchu azydku ołowiu w ciągu 5 s od chwili jego ogrzewania w niej wynosi 300- 356 °C [3, 9, 22, 27, 29, 31-36]. Wysoka termiczna stabilność trójnitrorezorcynianu ołowiu i azydku ołowiu potwierdzona została długotrwałymi badaniami nad jego przechowywaniem w warunkach izotermicznych w temperaturze 50 °C przez 25 miesięcy oraz w temperaturze 80 °C przez 15 miesięcy [3]. Po przeprowadzeniu testów na długotrwałe przechowywanie nie wykryto żadnych zmian fizykochemicznych mogących spowodować zmniejszenie wrażliwości azydku ołowiu i trójnitrorezorcynianu ołowiu na bodźce termiczne i/lub mechaniczne oraz obniżenie ich zdolności inicjowania.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy metod badań i oceny fizykochemicznej stałości przedstawionej grupy inicjujących materiałów wybuchowych, reprezentatywnej w odniesieniu do środków bojowych stosowanych w Siłach Zbrojnych RP, obejmującej piorunian rtęci, azydek ołowiu, trójnitrorezorcynian ołowiu i tetrazen, można wyciągnąć następujące wnioski.

1. Najbardziej niestałymi termicznie inicjującymi materiałami wybuchowymi są: piorunian rtęci i tetrazen.
2. Najbardziej stałym termicznie inicjującym materiałem wybuchowym jest azydek ołowiu a następnie trójnitrorezorcynian ołowiu.
3. Najmniej odpornymi na działanie wilgoci inicjującymi materiałami wybuchowymi, ulegającymi dosyć łatwo hydrolizie jest azydek ołowiu i tetrazen.
4. Najbardziej uniwersalną i przydatną techniką badania stałości inicjujących materiałów wybuchowych jest DSC, zalecana do tego typu badań w ramach standardowych metod NATO również w zakresie badania zgodności materiałowej (reaktywności chemicznej) [37] inicjujących materiałów wybuchowych z materiałami konstrukcyjnymi stosowanymi w środkach bojowych, w tym amunicji.
5. Na etapie przygotowywania próbek inicjujących materiałów wybuchowych do badań ich fizykochemicznej stałości należy dążyć do zachowania stałej masy próbki, jej powtarzalnego rozdrobnienia, zwracając przy tym uwagę na jej budowę krystaliczną a także należy zapewnić określony poziom wilgotności środowiska otaczającego próbkę jak i zawartości wilgoci w materiale samej próbki.

Niniejszy artykuł powstał podczas realizacji pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2006 - 2008 w ramach Projektu Badawczego Nr 0 T00 030 30 p.t. „Badanie i modelowanie fizykochemicznych procesów starzeniowych zachodzących w precyzyjnych urządzeniach do inicjowania działania środków bojowych”, przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Standardization Agreement (STANAG) 4170, Principles and methodology for the qualification of explosive materials for military use, Edition 2, 2001;
- [2] Allied Ordnance Publication (AOP) 7, Manual of data requirements and tests for the qualification of explosive materials for military use, Edition 2, 2002;
- [3] USA Department of The Army Technical Manual TM 9-1300-214, Military explosives, pp. 7-1 – 7-20; A-7, Headquarters, Department of The Army, September 1984;
- [4] USA NAVORD (Navy Ordnance) OD 44811 Volume 1, Safety and performance tests for qualification of explosives, Commander, Naval Ordnance Systems Command, 1 January 1972;
- [5] Standardization Agreement (STANAG) 4556, Explosives. Vacuum stability test, Edition 1, 1999;
- [6] Encyclopedia of Explosives and Related Items, vol. 1, Picatinny Arsenal, Dover, New Jersey, USA, 1960-1984, p. XXVI;
- [7] Encyclopedia of Explosives and Related Items, vol. 5, Picatinny Arsenal, Dover, New Jersey, USA, 1960-1984, D.1279;
- [8] Encyclopedia of Explosives and Related Items, vol. 6, Picatinny Arsenal, Dover, New Jersey, USA, 1960-1984, F.221;
- [9] Editors: S. Krishnan, S. Chakravarthy, S.K. Athithan, Propellants and explosives technology, Allied Publishers Limited, India, 1998, p. 252;
- [10] Proceedings of The 2005 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics, Theory and Practice of Energetic Materials, vol. 6, Science Press China, Science Press USA, 2005, pp. 327-332;
- [11] Proceedings of The 17th International Pyrotechnics Seminar combined with The 2nd Beijing International Symposium on Pyrotechnics and Explosives, Beijing Institute of Technology Press, vol. 1, 1991, p. 445;
- [12] Polska Norma PN-V-04011-21:1998; Kruszące materiały wybuchowe o przeznaczeniu wojskowym. Metody badań. Oznaczanie stabilności.
- [13] L.W. Dubnov, N.S. Bakharevich, A.I. Romanov, Promyshlennoe vzyryczatye veschestva, Idatelstvo NEDRA, Moskva 1973, Rosja, p. 98;
- [14] Dane otrzymane z strony internetowej o adresie: www.nikristall.ru Federalnovo Gosudarstvennogo Unitarnogo Predprijatija “Gosudarstvennogo Nauczno-Issledovatelskogo Instituta KRISTALL”, Dzierżyńsk, Rosja 2006;
- [15] Gosudarstvennyj Standard (GOST) SSSR No. B 84-744-73;
- [16] Branżowa Norma BN-76/6091-41, Materiały wybuchowe. Oznaczanie stałości za pomocą różnicowej analizy termicznej;
- [17] Standardization Agreement (STANAG) 4515, Explosives. Thermal characterization by Differential Thermal Analysis, Differential Scanning Calorimetry and Thermogravimetric Analysis Edition 1, 2002;
- [18] T. Urbański, Chemia i technologia materiałów wybuchowych, vol. 3, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa, 1955, p. 107-109;

- [19] N.E. Jaremenko, B.J. Svetlov, Teorija i tehnologija vzryvczatyh veschestv, Gosudarstvennoe Izdatelstvo po stroitelnyh materialam, Moskva, SSSR, 1957, p.204-211;
- [20] S.F. Vaskovskij, Prakticzeskoje rukavodstvo po obraszczenu c vzryvczatyh veschestvami, Izdatelstvo GOSGEOLTECHIZDAT, Moskva, SSSR, 1957 p.37-38;
- [21] K.K. Andreev, A.F. Belayev, A.I. Golbinder, A.G. Gorst, Teorija vzryvczatyh veschestv, Gosudarstvennoe Nauczno-techniczeskoe Izdatelstvo OBORONGIZ, Moskva, SSSR, 1963, p. 515-522;
- [22] M.A. Budnikow i inni, Materiały wybuchowe i elaboracja, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa, 1955, p. 117-130;
- [23] Proceedings of the 3rd International Symposium on Chemical Problems connected with the Stability of Explosives, Editor J. Hansson, Sundbyberg, Sweden, 1973, p.43;
- [24] J. Yinon, S. Zitrin, Modern Methods and Applications in Analysis of Explosives, John Wiley and Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1996, p.15-17;
- [25] Russian Federation Patent No RU 2 175 652 entitled, Heat Resistant Percussion Nonrust Inducing Igniter Composition for Cartridges of Small Arms;
- [26] Proceedings of the 4th International Symposium on Chemical Problems connected with the Stability of Explosives, Editor: J. Hansson, Sundbyberg, Sweden, 1976, p.347;
- [27] A.G. Gorst, Poroča i vzryvczatyje veschestva, Izdatelstvo GOSIZDAT Oboronnoj Promyslennosti, Moskva, SSSR, 1957, p. 108;
- [28] Proceedings of the 3rd International Symposium on Chemical Problems connected with the Stability of Explosives, Editor J. Hansson, Sundbyberg, Sweden, 1973, p.1-5;
- [29] Standardization Agreement (STANAG) 4491, Explosives. Thermal sensitiveness and explosiveness tests, Edition 1, 2002;
- [30] Explosivstoffe 8 (1965), pp. 205-220;
- [31] Explosivstoffe 2 (1969), pp. 25-31;
- [32] Propellants, Explosives, Pyrotechnics 5 (1992) pp. 241-248;
- [33] J. Yinon, S. Zitrin, The analysis of explosives, Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt /M., 1981, p. 135;
- [34] F.P. Bowden, A.D. Yoffe, Initiation and growth of explosion in liquids and solids, Cambridge University Press, 1952, p. 27;
- [35] Proceedings of 9th International Symposium on Fireworks, Berlin, Germany, 2006, p.321;
- [36] J. Taylor, Solid propellant and exothermic compositions, George Newnes Ltd., London, 1959, pp. 40-50;
- [37] Standardization Agreement (STANAG) 4147, Chemical compatibility of ammunition components with explosives (non nuclear application), Edition 2, 2001.