



## **NDT Assessment Model for Missile Motors**

Borislav GENOV

Department of Development of Armament, Technics and Materials, Defence Institute, Sofia, Bulgaria  
Phone: +359 2 9221850, Fax: +359 2 9221808; e-mail: [b.genov@di.mod.bg](mailto:b.genov@di.mod.bg)

### **Abstract**

The unguided missiles probably are one of the most spread ammunitions in our stockpile. Produced in late 80th, they are with questionable safety and ballistic performance and reliability. The results from the last ballistic tests showed highly unreliability and mixed results.

Due to their age, the standardized test will be not effective alone and new ones should be added to obtain additional information regarding technical conditions.

The recent author researches had shown that the non-destructive methods give significant perspective mainly in production of ammunition elements, but also as qualification tool during ammunition service life, when the aging of their components exists.

Unfortunately, due to significant differences between industry requirements and ammunition qualification area the research in this area is not significant and standardization of these tests is not on the agenda.

In this article the step in this direction is proposed – to provide the criteria giving the prior perspective of selection of non-destructive methods as powerful tool in ammunition qualification processes.

**Keywords:** missile motor, ammunition life cycle, ageing, non-destructive testing

## **Модел за оценка на техническото състояние на двигатели на реактивни снаряди, базиран на резултатите от контрол без разрушаване**

Борислав ГЕНОВ

### **1. Въведение**

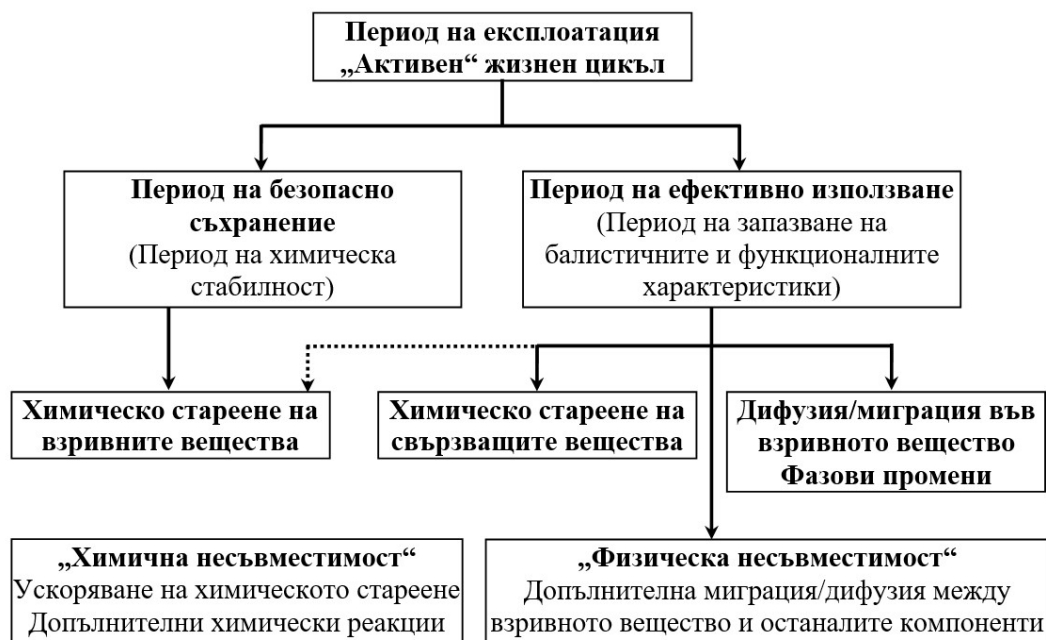
Периодът на безопасно съхранение боеприпасите (safe (storage) life/chemical shelf life) е съизмерим с периода, в който пиротехническите състави и взривните вещества остават химически стабилни и е лимитиран от скоростта на химичните реакции на деградация.

Другата основна компонента на периода на експлоатация е тази, в който боеприпас може да се използва по предназначение ефективно и безопасно (взривното вещество е безопасно за използване и функционалните характеристики отговарят на изискванията). По този начин, основните фактори които лимитират горната граница на този период са: химично остаряване на взривните вещества (намаляването на енергийните характеристики на взривното вещество) или технологичните добавки (промени в механичните качества от типа на деградиране или намаляване на пластичността), както и процесите с физичен характер във взривното вещество (дифузия или фазови промени).

Реакциите, дължащи се на несъвместимостта между взривните вещества, пиротехнически състави и продуктите на деградацията им също могат значително да намалят срока на годност на взривните вещества, а оттам и на целия боеприпас.

Химическата несъвместимост може или да ускори „нормалните“ реакции на стареене или дори да стане причина за нови, допълнителни механизми за стареене.

„Химичната несъвместимост“ оказва влияние едновременно върху периода на безопасно съхранение и периода в който боеприпасът запазва ефективността си [7]. Физичната несъвместимост се причинява от процеси с дифузионен характер между взривното вещество и другите компоненти на системата. Обикновено тя повлиява единствено върху периода в който боеприпасът запазва ефективността си [18].



Фиг.1. Компоненти и фактори, влияещи на срока на годност на боеприпасите (адаптирано по [10])

Урбански в [13] посочва, че трябва да се разглеждат три типа стабилност: химическа, механична и балистична, като по подобие на Екхарт в [9], приема, че механичната и балистичната стабилност зависят от химичната.

Независимо че повечето разработки, свързани с проблематиката „срок на годност на боеприпаси“, са фокусирани върху химичното стареене и реакции вследствие на несъвместимостта, трябва да се отбележи, че физичното стареене и процесите от несъвместимостта понякога са с по-голямо влияние върху срока на годност на боеприпасите [13]. Това според мен се дължи на факта, че ефектите от несъвместимостта трудно се оценяват в пълна степен в ранните етапи на жизнения цикъл.

Независимо от многобройните типове известни взривни вещества със съответните многобройни механизми за стареене, могат да се дефинират няколко общи закономерности.

Химичното стареене на чистите органични взривни вещества най-често стартира с хомолитично разпадане при най-слабата връзка, последвано паралелни реакции със производните от разлагането вещества;

Взривните вещества, които са неорганични съединения (напр. азидите и фулминатите на оловото, среброто и живака) покриват целия спектър – от много стабилни (оловен азид) до много нестабилни (живачен фулминат, който дори реагира с метали при наличие на определени нива на атмосферната влажност).

За разлика от единични случаи (напр. използването на тринитротолуена), в повечето случаи взривните вещества се използват като елементи на смеси с други взривни вещества и/или свързващи вещества (т.нар. пълнители или от англ. binders).

Доказано е, че ефектите на стареене на взривната смес се определя основно от доминиращото взривно вещество.

Енергията на разкъсване на най-слабата връзка при хомолитична декомпозиция представлява добър индикатор за термоустойчивостта на съответното взривно вещество. Като неоспорима теза е прието, че взривни вещества с енергия на разлагане над 170 kJ/mol са стабилни (за хиляди години) при нормални температури, докато за стойности под 155 kJ/mol, химичната стабилност е ограничена и следва да се оценява по надежден и достоверен способ.

На базата на наличната информация се налага изводът, че основните взривни вещества, елементи на бойните части и взривателите на боеприпасите, попадат в класовете на ароматните нитросъединения и алифатичните нитроамини, които се отличават с висока стабилност.

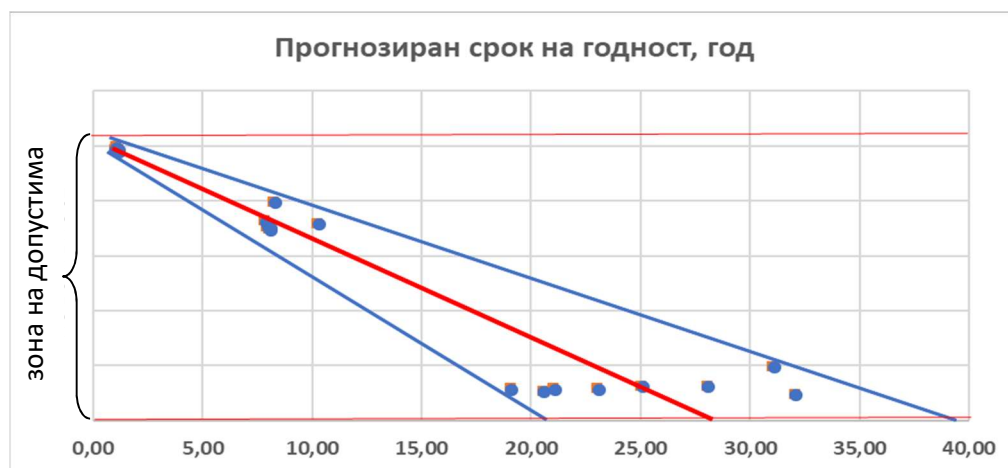
Не така стои въпросът с метателните заряди и ракетни горива, базирани на нитроцелуозни нитрати (с между 12,2 и 13,4% азотно съдържание). Особено критичен е проблемът с ракетните горива на двигателите.

## 2. Анализ на състоянието

### 2.1 Негативни тенденции

В [20] са анализирани някои от негативните тенденции, като е отбелязан и фактът, че е налице определена неопределеност на резултатите от изпитанията, като дори се получават сериозни разлики в поведението на отделни групи в съответната партида. Визуализация на тази констатация е направена на фиг. 2.

Това според мен се дължи на различния профил на климатико-механични натоварвания при служебното обръщение.



Фиг.2. Различни очаквани реални срокове на годност за отделни групи от една партида на базата на резултати от изпитанията (вариант)

### 2.2. Съществуващи подходи за освидетелстване

Фундаментално, в основата на освидетелстването на боеприпасите, независимо от типа им и сложността им, стои получаването на два основни отговора [1]:

- Техническото състояние, позволяващо да се оценят бойната ефективност и безопасността на служебно обръщение;
- Остатъчният период на експлоатация (на системно ниво).

В този аспект, целта на освидетелстването е да се получи [4]:

- информирана оценка за вероятността боеприпасът от дадената партида, независимо от датата на производство, че е безопасен за служебно обръщение;
- доказателство за надеждността на боеприпаса;
- по-висока достоверност на прогнозата за продължителността на периода на експлоатация;
- повишаване на ефективността на системата за поддръжка и ремонт;
- минимизиране на вероятността от инциденти при освобождаване на излишните боеприпаси.

Анализът на специализираната литература показва наличието на няколко нива на системата за освидетелстване в зависимост от целите, които се преследват, а именно:

- безопасност при съхранение – ограничава се до проверка на запаса на химическа стабилност и само при противоречива информация и други тестове;
- безопасност в служебно обръщение – ограничава се до проверка на запаса на химическа стабилност и други изпитвания за доказване на допустимостта от ударни и вибрационни натоварвания;
- надеждност и функционалност при използването по предназначение – балистични и функционални изпитвания (в т.ч. и с контролно-проверовъчна апаратура там където е приложимо); извършване на статистическа оценка;
- планиране за поддръжка и/или ремонт;
- повишена безопасност или надеждност в служебно обръщение – добавят се и климатични въздействия.

Има различни възприети практики в областта в различните страни – вариращи от първоначален заложен кратък период на експлоатация с последващо продължаване, до заложен продължителен със задължително освобождаване на боеприпасите като излишни в края му.

Независимо от приетия подход, системата за освидетелстване може да се приеме за унифицирана и обхваща няколко процеса:

- мониторинг на техническото състояние и анализ на резултатите;
- получаване, обработка и анализ на резултати от бойното използване;
- изпитания за определяне на остатъчния/окончателния период на експлоатация и анализ на резултатите.

По този начин имаме гаранция, че всяко увеличаване на срока на годност след прогнозирания ще бъде базирано на достоверна информация за техническото състояние.

При неуправляемите реактивни снаряди най-критичният елемент наред с пиротехническите състави, се явяват маршевите твърдотопливни двигатели [18], чийто срок на годност на практика определя и срока на годност на целия продукт.

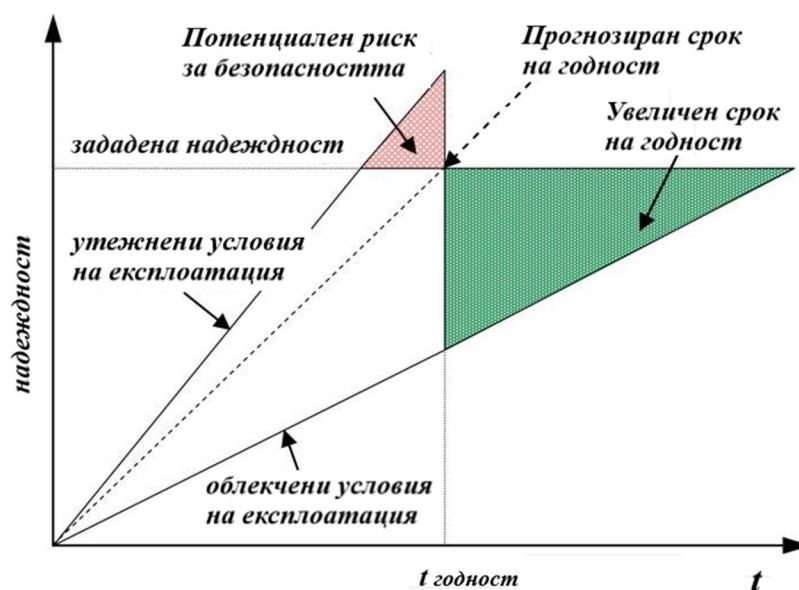
По отношение на нитроцелуозните горива за неуправляеми реактивни снаряди са възприети различни подходи за освидетелстване, като наред с тези свързани с балистичните и механичните характеристики [18] (вж. табл. 1), задължително се търси оценка на химическата стабилност.

За съжаление химическата стабилност не е достатъчна, още повече че съвсем реален сценарий се оказва да съществуват химически стабилни барути, но да бъдат налични дефекти в структурата или микропукнатини, които могат да окажат негативно влияние в процеса на работа на двигателя. На фиг. 5. са поместени реални резултати от електронна сканираща микроскопия, при която е изследван барутен заряд, който е химически и термично стабилен, но при който ясно са различими микро и макро пукнатини.

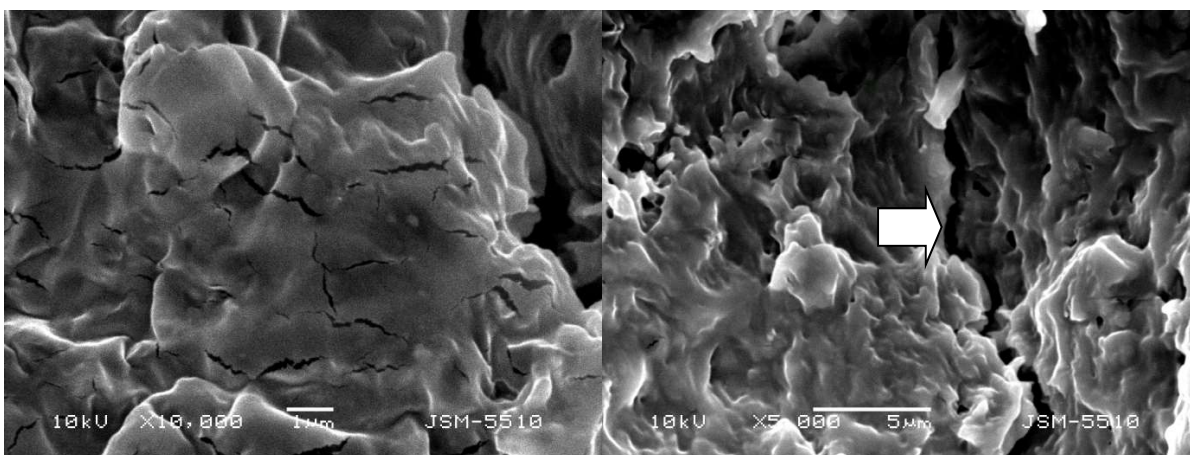
Този факт е предпоставка в моделите за освидетелстване да бъдат включени и други източници на информация.



Фиг.3. Фактори, влияещи за периода на експлоатация на барутните двигатели.



Фиг. 4. Различни очаквани реални срокове на годност за отделни групи от една партида на базата на резултати от изпитанията (вариант)



Фиг. 5. Микро (вляво) и макропукнатини (вдясно), получени при изкуствено състаряване на барутна шашка

**Таблица 1. Класификация на механизмите за стареене, ефектите и прилаганите методи за оценка на техническото състояние на барутни двигатели**

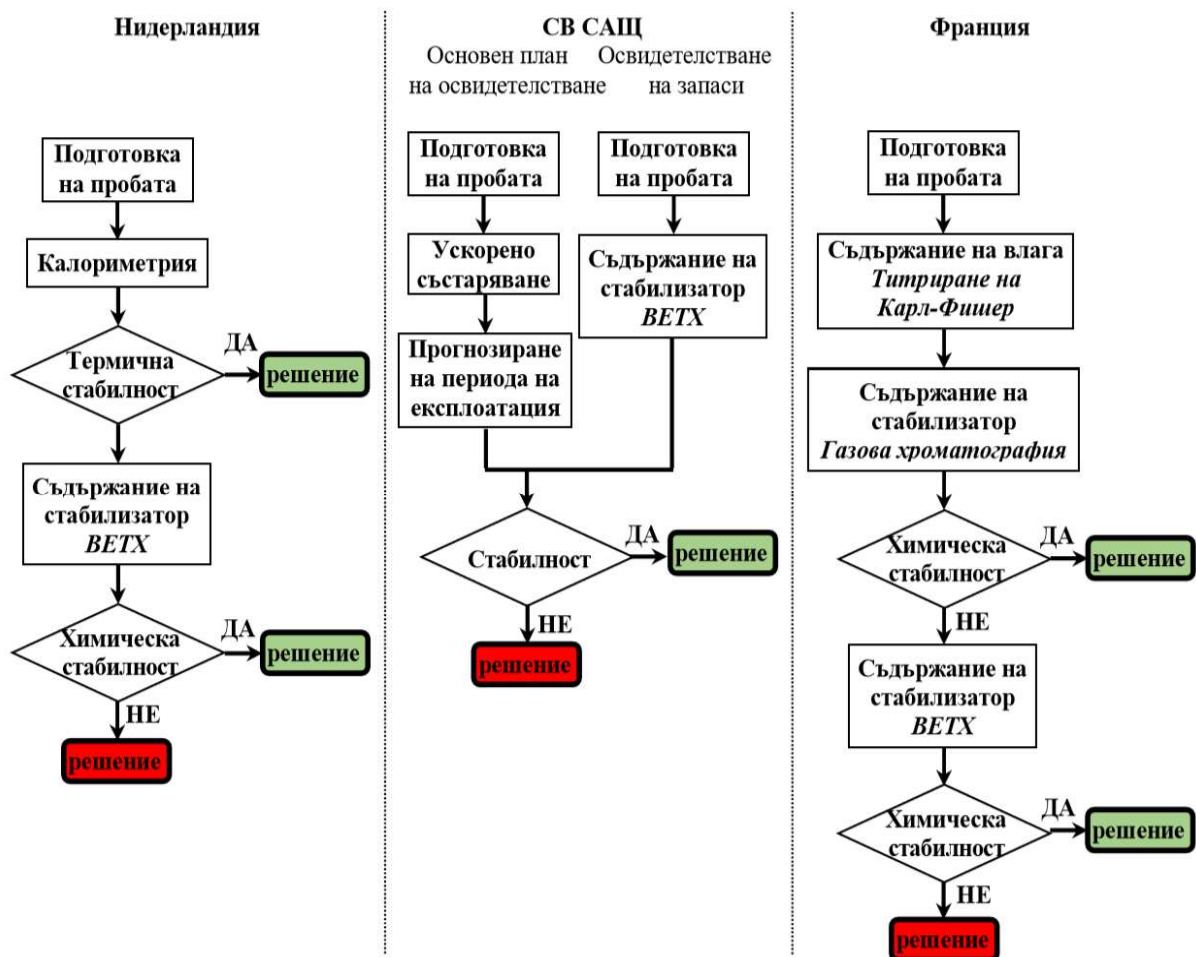
Механизъм на деградация	Вероятни ефекти	Изпитване	Стандарт
<b>Стандартизирани тестове</b>			
Разкъсване на CO-NO <sub>2</sub> връзка на нитратния естер	Генерирана топлина	Калориметрия	STANAG 4582
	Отделяне на NO <sub>x</sub> газове	Тест на Абел <sup>1</sup>	AOP-7
		80° тест <sup>1</sup>	AOP-7
		Метил виолетов тест 120°C <sup>2</sup>	AOP-7
		65,5° Fume Test <sup>2</sup>	AOP-7
	V&J тест (115°C)		
Намаляване на количеството на стабилизатора	Високоскоростна течна хроматография	AOP-48	
Разкъсване на нитроцелуозната връзка	Намаляване на молекулярната маса	Гел-пропусклива хроматография	Разработва се
	Крежкост и влошаване на механичните качества	Скорост на изгаряне (нишка)	STANAG 4507
	Промяна на балистичните качества	Скорост на изгаряне (нишка)	AOP-7
		Балистична бомба	STANAG 4115
Дифузия на пластификатора и/или други елементи	Промяна в механичните и вискоеластичните качества	Изпитване на опън, Динамичен механичен анализ	STANAG 4507
	Промяна на балистичните качества	Скорост на изгаряне (нишка)	AOP-7
	Несъвместимост с контактния материал	Калориметрия, Термогравиметричен анализ, Диференциална сканираща калориметрия	STANAG 4147
	Миграция на нитро-глицерин в инхибитора	Високоскоростна течна хроматография	
Поглъщане на влага	Хидролиза	Газова хроматография (вода и остатъчен разтворител)	Национален стандарт САЩ
		Титруване на Карл-Фишер	
<b>Верифицирани и валидирани методи</b>			
Други	Промени в цвета	Визуален контрол	
	Крежкост или разпрашаване		

<sup>1</sup> Използва се от Великобритания

<sup>2</sup> Използва се от САЩ

### 3. Предложен модел

Различните нации имат различни подходи, като най-често това става на базата на оценка на остатъчното количество на стабилизатора (с или без изкуствено състаряване) (фиг. 6).



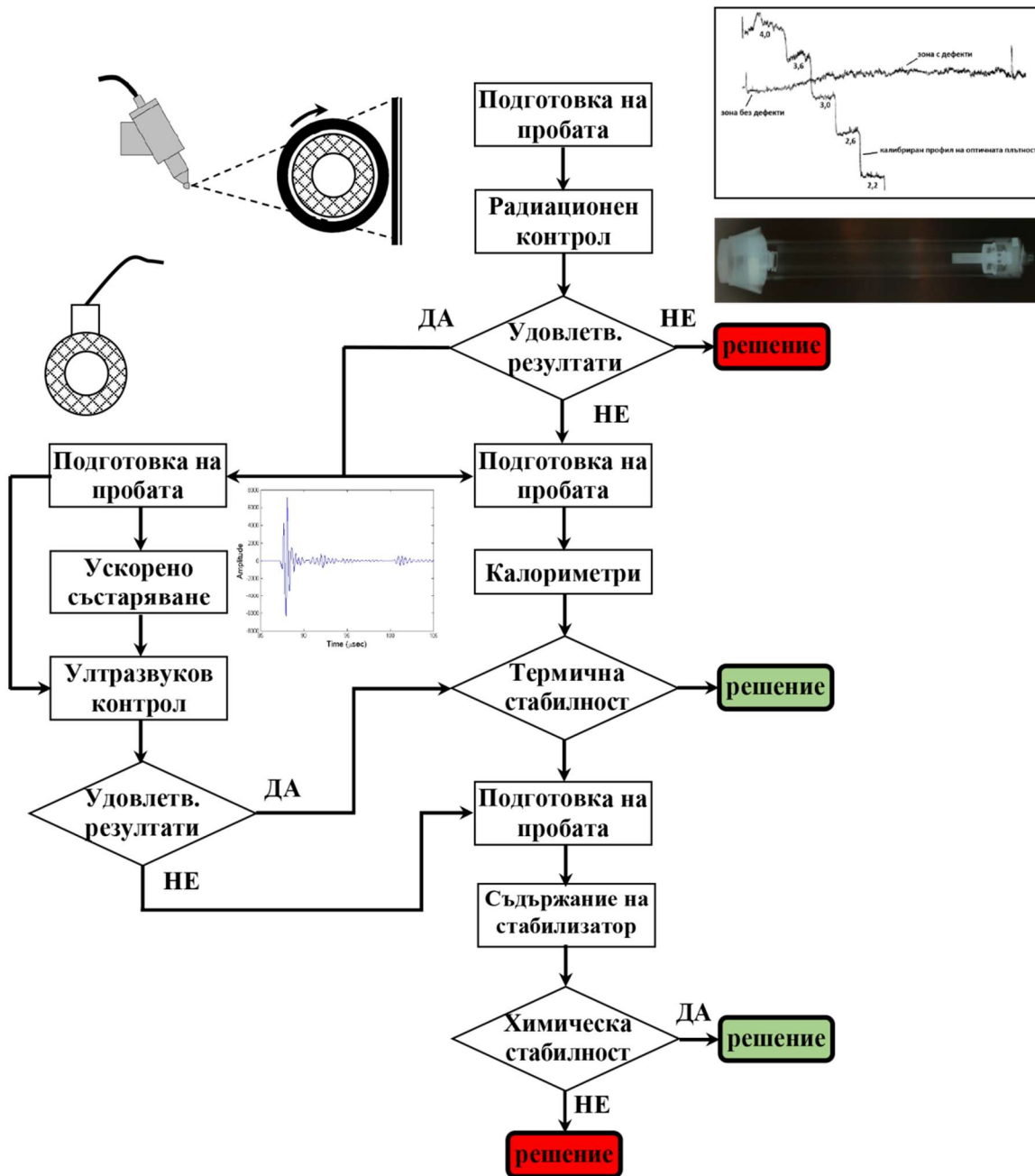
Фиг. 6. Алгоритъм при различни подходи при оценката на химическата стабилност

Удачен подход е да се включат по възможност методи за контрол без разрушаване, за които са налице достатъчно данни за приложимост.

Предвид големия период на експлоатация, задължително трябва да се търсят възможно най-много източници на информация, което на практика означава инкорпориране на всички стандартизирани методи за доказване на химическа и термична стабилност.

Включването на методи за КБР в случая от една страна би допринесло за намаляване на броя на разрушаваните образци, защото предвид направените прогнози (вж. фиг. 2) ще бъде необходимо увеличаване на броя на тестовите образци. От друга страна ще бъде получена информация, която не може да бъде получена по никакъв алтернативен начин.





Фиг. 7. Алгоритъм на предложения модел

Такива методи за КБР, които едновременно може да се използват и за контрол на съвместимостта и за откриване на дефекти и промени в структурата (радиационен контрол), както и за индиректна индикация за намаляване на съдържанието на стабилизатора (ултразвуков контрол) са предложени в [17, 18, 22], като експериментално е доказана приложимостта им. А радиационните методи от своя страна могат да се използват и за окончателен метод на контрол на асемблирането на изделията като цяло.

Радиационният контрол е удачно да предшества всички останали, предвид факта, че е по-високопроизводителен.



## 4. Резултати и дискусия

Предложеният модел за оценка дава възможност да бъдат обединени и добавени няколко източника на информация, което би допринесло за повишаване на достоверността на оценката на техническото състояние.

Инкорпорирането на методите за КБР води до следните ползи:

- повишаване на информираността на оценката;
- намаляване на броя на изпитваните по деструктивен път образци;
- възможност за избягване на скъпо струващи и деструктивни методи.

Независимо, че поотделно резултатите от радиационния и ултразвуковия КБР са верифицирани в [17, 18, 19, 20], в следваща разработка ще бъдат демонстрирани резултатите, подчинени на алгоритъма на фиг. 6. посредством дефиниран казус – реален боеприпас.

## 5. Заключение

Предложеният подход е перспективен, защото носи едновременно ползи с икономически характер (намаляване на себестойността на изпитанията) и с технически характер (повишаване на достоверността на оценката на техническото състояние).

Извършеното верифициране на резултатите от КБР поотделно на радиационния и ултразвуковия КБР в [17, 18, 19, 20] е достатъчно за прилагането им.

Независимо от този факт, в следваща разработка ще бъдат демонстрирани резултатите посредством дефиниран казус – реален боеприпас.

## Литература

1. AOP-46 The Scientific Basis for the Whole Life Assessment of Munitions. Ed. 1. (2006). NATO Agency for Standardization.
2. AOP-48 Explosives, Nitrocellulose Based Propellants, Stability Test Procedures and Requirements using Stabilizer Depletion.
3. AOP-4682 ed. A ver.1. Energetic Materials, Test Methods for Ingredients. (2018). NATO Standardization Office.
4. AOP-62 In-Service Surveillance of Munitions General Guidance.
5. AOP-63 In-service Surveillance of Munitions, Sampling and Test Procedures.
6. AOP-64 In-service Surveillance of Munitions Condition Monitoring of Energetic Materials.
7. Army Regulation AR 702–6 Ammunition Stockpile Reliability Program, Headquarters Department of the Army, Washington, DC, 1 December 1982.
8. Bohn, M. A. NC-based energetic materials – stability, decomposition and ageing, presentation on the meeting Nitrocellulose supply, ageing and characterization. 2007.
9. Eckhardt, C. J. Energetic Materials: Part 1. Decomposition, Crystal and Molecular Properties, Edited by P.A. Politzer and J.S. Murray. From the series: Theoretical and Computational Chemistry, Vol. 12, Elsevier, 2003.
10. STANAG 4115 ed. 2., Definition and determination of ballistic properties of gun propellants, NATO Standardisation Agency, 1997.
11. Urbanski T., Chemistry and Technology of Explosives, vol. 1, (1<sup>st</sup> ed.), Pergamon Press, 1964.
12. Urbanski T., Chemistry and Technology of Explosives, vol. 2, (1<sup>st</sup> ed.), Pergamon Press, 1965.

13. Urbanski T., Chemistry and Technology of Explosives, vol. 3, (1<sup>st</sup> ed.), Pergamon Press, 1967.
14. Urbanski T., Chemistry and Technology of Explosives, vol. 4, (1<sup>st</sup> ed.), Pergamon Press, 1984.
15. Wilker S., J. Pteržilek, J. Skládal, U. Ticmanis, G. Pantel. Stability Analyses of Double Base Propellants in Dependence of their DPA and NGL Content, Proc. of the 4th Seminar “New Trends in Research of Energetic Materials”, University of Pardubice, 2001, p. 369.
16. Wilker, S., G. Pantel, L. Stottmaister. (2003) Stability Analyses of Porous Propellants, Proceedings of the 6th Seminar “New Trends in Research of Energetic Materials”, University of Pardubice, 2003.
17. Генов Б. и др. Възможности за използване на акустични методи за контрол без разрушаване на елементи от боеприпаси. Акустика, 2013.
18. Генов Б. и др. Възможности за използване на радиационни методи за оценка на техническото състояние на твърдотопливни ракетни двигатели. XXIX Международна конференция „Дефектоскопия’14“, Созопол, 2014.
19. Генов Б. и др. Приложение на теорията на надеждността при увеличаване на срока на годност на боеприпасите, 7-ма международна научна конференция в рамките на XI-та Международна изложба „Хемус 2014 – Отбрана, антитероризъм и сигурност“, Пловдив, 2014.
20. Генов Б. Критерии за избор и необходимост от прилагане на методите за контрол без разрушаване за откриване на дефекти в материалите и продуктите. Лекционен фонд на Шуменски университет „Еп. К. Преславски“, 2013.
21. Генов Б. и др. Анализ на неудовлетворителните резултати от полигонни и контролни лабораторни изпитвания на боеприпаси на територията на ЦАТИП през 2013 г. Институт по отбрана „Проф. Цветан Лазаров“, 2014.
22. Генов Б. и др. Възможности за използване на методите за контрол без разрушаване в етапите на жизнения цикъл на боеприпасите. XXX Международна конференция „Дефектоскопия’15“, Созопол, 2015.