



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ

**ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЧНИ ТЕХНОЛОГИИ
КАТЕДРА „ТЕКСТИЛ, КОЖИ И ГОРИВА“**

Инж. Христофор Иванов Скандалиев

**ПОЛУЧАВАНЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ
НА ЕКОЛОГИЧНИ И НЕТОКСИЧНИ
ТВЪРДИ РАКЕТНИ ГОРИВА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор“
по научна специалност 5.10. Химични технологии
(Технология на природните и синтетичните горива)

Научен ръководител: доц. д-р инж. Весислава Тотева

Научно жури:

1. - председател
2. - рецензент
3. - рецензент
4.
5.

София, 2026

Дисертационният труд е написан на 147 страници, съдържа 58 фигури и 27 таблици. Цитирани са 120 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на разширен катедрен съвет на катедра „Текстил, кожи и горива“ при Химикотехнологичен и металургичен университет - София, проведено на 02.04.2026 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на2026 год. отчаса в зала, сграда на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересуващите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности“, стая 406, етаж 4, сграда „А“ на ХТМУ.

ОЗНАЧЕНИЯ

d - диаметър, m
 D_o - диаметър, m
 S, A - площ, m²
 g - земно ускорение, m s⁻²
 F - тяга, N
 K_n - клемунг,
 I_{sp} - специфичен импулс, s
 I_{tot} - пълен импулс, N.s
 M - маса, kg
 P - налягане, Pa
 T - абсолютна температура, K

Долни индекси:

ок – окислителен
burn – изгаряне, доизгаряне
end – краен
i – пореден номер
ign – запалване

t - температура, °C
 t - време, s
 V - обем, m³
 $\alpha_{ок}$ - коефициент за обезпеченост (съдържание)
на окислителен агент
 u, r - скорост на горене, m/s
 ν, n - степенен показател в закона за горене на
Виеле,
 ρ - плътност, kg m⁻³

j – номер на итерация
 k – компонент
 m – масов
max – максимално
 o – начални условия
 v – обемен

АКРОНИМИ

ТРГ - твърдо ракетно гориво
СТРГ - смесево твърдо ракетно гориво
ТГРД - твърдогоривен ракетен двигател
ДВГ - двигател с вътрешно горене
ОГП - обща горяща повърхност
АП - амониев перхлорат
КП - калиев перхлорат
АН - амониев нитрат
КН - калиев нитрат

НН - натриев нитрат
ГСВ - горивосвързващо вещество
КБ (ОВ) - кислороден баланс (oxygen balance)
ДТА - диференциално-термичен анализ (DTA)
ТГА - термогравиметричен анализ (TGA)
CFD - Computational Fluid Dynamics
FEM - Finite element method
LCA - Life cycle assessment

Актуалност на проблема

Съвременната аерокосмическа техника е шедьовърът на вечно търсеция човешки дух в неговото многовековно и бурно развитие. Модерните системи за реактивно задвижване и управление могат да бъдат определени като квинтесенция на всички научни, технически и технологични достижения на човечеството. Те са двигателят, тласкащ развитието на научните открития, технологиите и материалознанието във всички области на съвременния бит. Информационните технологии и системите за комуникации достигат висоти, които трудно можем да осъзнаем. Терминът „*Rocket Science*” се е превърнал в нарицателно и събирателно определение за върхова наука, независимо за коя област на познанието се отнася.

Този бум на аерокосмическите технологии, и отражението им във всички сфери на икономиката и бита ни, поражда логичния въпрос: дали всичко свързано с използването им е толкова „розово“? С други думи, само безгранични ползи ли получаваме при тяхната употреба? Отговорът на този важен въпрос е по-скоро отрицателен [1] и затова е наложително намирането на инженерни и технологични решения, някои от които се предлагат в този дисертационен труд.

Основната цел на настоящия дисертационен труд е разработването на твърди ракетни горива (ТРГ), които да притежават висока безопасност при производство, съхранение и експлоатация, както и намален екологичен отпечатък. Да бъдат базирани на достъпни суровини, които не попадат под специални ограничения, което да улеснява тяхното получаване. Технологиите за преработката им да са едновременно безопасни и опростени, с цел минимизиране на рисковете и сложността при производствения процес. Създадените енергонасителни материали да могат да служат като заместители на вече съществуващи горива или да изпълняват напълно нови функции в изделия, предназначени за конкретни области на приложение.

За да бъде постигната целта е необходимо да бъдат изпълнени следните **задачи**:

- Избор на подходяща компонентна база.
- Съставяне на горивни рецептури.
- Разработване на технологични решения за получаване на горивни заряди.
- Изследване на характеристиките на получените горива.
- Оценяване на предимствата и недостатъците на получените екологични ТРГ чрез сравнителен анализ.

Една от важните стъпки за успешно получаване на нови състави ТРГ е изборът на устойчив изследователски подход. Същността на този избор е обусловена от намирането на подходящ компромис в логическата матрица **екологичност - стабилност - производителност**. В настоящото изследване е приложено гъвкаво решение, което е компромисно и е изместено в една или друга посока между тези противоречиви изисквания. За сметка на частично редуциране на енергетичната въоръженост на новосъздадените горива, е търсено максимално удовлетворяване на критериите за безопасност, достъпност и нисък екологичен отпечатък.

В обобщение на проведената научно-изследователска дейност и натрупания огромен практически опит, беше извървян дългия път **от извършването на първоначални моделни симулации до успешно създаване и изпитване на образци екологично чисти и нетоксични твърди ракетни горива**.

Основните обекти на изследване са определени в две групи смесиви твърди ракетни горива:

1. Твърдо гориво от карамелен (захарен) тип: **калиев нитрат/изомалт**.
2. Твърди горива, базирани на окислителите **алкални (мета)перiodати (KIO₄ и NaIO₄)**.

Допълнително са изследвани референтни карамелни състави **калиев нитрат/захарид** (глюкоза, фруктоза, захароза, лактоза, сорбитол, еритритол, манитол и ксилитол) само по отношение скорост на горене при атмосферно налягане и хигроскопичност.

Състояние на проблема. Екологични аспекти при използването на химически ракети

Принципът на работа на химическите ракети е свързан с изхвърлянето на газообразни продукти и аерозоли, загрети до много високи температури. Този процес не може да се избегне, но може да се редуцира количествено и да се регулира чрез промяна на химичния състав на отработените вещества. Въздействията върху околния свят се проявяват в следните посоки:

- Замърсяване на атмосферния въздух с продукти от изгарянето на горивата в ракетните двигатели;
- Натрупване на токсични вещества в литосферата, хидросферата и биосферата на Земята;

- Радиационен натиск върху енергийния баланс в земната атмосфера и нарушения на озоновия слой;
- Драстично увеличаване на количествата космически отпадъци в орбита около Земята и падане на отломки на земната повърхност.

Емисиите от твърдите ракетни горива включват освен газообразни продукти (H_2O (водни пари), H_2 , OH радикали, CO , CO_2 , NO_x , N_2), също и големи количества Al_2O_3 , HCl , Cl и оксиди на някои тежки метали. Хлорните съединения са продукт от термичната деструкция най-вече на амониевия перхлорат (АП), а алуминиевият оксид се получава при изгарянето на прахообразния алуминий, включван почти задължително в широко използваните горива. При напускане соплото на ракетния двигател газообразният хлороводород се поглъща от атмосферната влага и образува фини капчици солна киселина. В един обем вода могат да се разтворят до 500 обемни части HCl . В зависимост от нивото на относителната влажност на въздуха, този процес може да премине към достатъчно високо насищане и да предизвика киселинен дъжд. Хлорът и другите хлорни съединения са изключително опасни и могат да се задържат на различни нива в атмосферата в продължение на години.

Алуминиевият оксид (Al_2O_3) се класифицира като опасен за дихателната система при хората и бозайниците. При продължителна експозиция може да доведе и до проблеми с нервната система. Въздействието му върху околната среда е доста комплексно, но се знае че разпръскването му в атмосферата оказва радиационен натиск чрез поглъщане на дълговълновото излъчване от Земята (парников ефект) и в същото време отражение на късовълновата радиация, идваща от космоса.

Подобно е въздействието на фините въглеродни частици (black carbon, BC). Те много ефективно поглъщат видимата светлина и могат милион пъти по-интензивно да нагряват атмосферата в сравнение с еквивалентно количество CO_2 по маса. В стратосферата ефектът на въглеродните сажди е в пъти по-силен, отколкото в приземните слоеве на атмосферата, заради намалената концентрация на кислород и заради липсата на валежи. Действието им на тази височина може да трае с години, докато в приземните слоеве се елиминира за няколко седмици.

Изводи от литературния обзор

1. Екологичният отпечатък от горенето на ТРГ е значителен – основният използван окислител амониев перхлорат (NH_4ClO_4) при горене отделя HCl и NO_x , които киселинно замърсяват атмосферата и водните системи. Алуминиеви оксиди, фини

въглеродни частици и хлорорганични продукти допълнително утежняват екологичното въздействие.

2. В световен мащаб не са намерени универсални решения за компонентно обезпечаване при създаването на иновативни екологично съобразени твърди ракетни горива.

3. Пълната замяна на перхлоратите, като основни окислители в ТРГ, не изглежда реалистична прогноза в обозримо бъдеще.

4. Успешните разработки в тази сфера се базират на новосинтезирани високоенергетични вещества, които са сложни за производство, чувствителни са към външни въздействия и са много скъпи.

5. Дилемата между енергетични показатели и безопасност остава основната технологична бариера – енергийните добавки увеличават ефективността на ТРГ, но също и рисковете при употребата им, както и цената.

6. Внедрени прототипи на иновативни ТРГ има предимно във военната сфера, главно заради високата им енергетика, а не толкова поради намалено екологично въздействие.

7. В гражданския сектор почти не се влагат нови горивни състави, поради недостатъчно изследваните им свойства и възможни сериозни рискове при тяхната употреба.

8. Възможности за екологично преобразяване на твърдите ракетни горива трябва да се търсят нишово - чрез намиране на подходящи оптимални решения, насочени към конкретни области на приложение.

9. Подходящи направления за провеждане на настоящото експериментално научно изследване са: 1. Получаване и охарактеризиране на подходяща разновидност на СТРГ от карамелен тип. 2. Използване на алкални метаперйодати като окислители за получаване на друга група иновативни СТРГ и определяне на техните свойства.

Избор на методология за провеждане на научното изследване

Една от важните стъпки за успешно получаване на нови състави ТРГ е изборът на устойчив изследователски подход. Същността на този избор е обусловена от намирането на подходящ компромис в логическата матрица **екологичност - стабилност - производителност**. В настоящото изследване е приложено гъвкаво решение, което е компромисно и е изместено в една или друга посока между тези

противоречиви изисквания. За сметка на частично редуциране на енергетичната въоръженост на новосъздадените горива, е търсено максимално удовлетворяване на критериите за безопасност, достъпност и нисък екологичен отпечатък.

В обобщение на проведената научно-изследователска дейност и натрупания огромен практически опит, беше извървян дългия път **от извършването на първоначални моделни симулации до успешно създаване и изпитване на образци екологично чисти и нетоксични твърди ракетни горива.**

Основните обекти на изследване са определени в две групи смесени твърди ракетни горива:

1. Твърдо гориво от карамелен тип: **калиев нитрат/изомалт.**
2. Твърди горива, базирани на окислителите **алкални (мета)перiodати (KIO₄ и NaIO₄).**

Допълнително са изследвани референтни карамелни състави **калиев нитрат/захарид** (глюкоза, фруктоза, захароза, лактоза, сорбитол, еритритол, манитол и ксилитол) само по отношение скорост на горене при атмосферно налягане и хигроскопичност.

Избрана е логическа схема на работа, която може да се представи в следния вид:



I. Използвани методи.

1. Методи за провеждане на изследванията.

Горивните рецептури, обект на това научно изследване, са съставени след анализ на множество налични данни от практиката, както на екипа, така и споделени като резултати от експериментални разработки на други автори, като те са актуализирани според изискванията на тази научна работа. Бяха проведени предварителни софтуерни симулации, които представят модели на протичащите химични взаимодействия между компонентите и дават резултати за термодинамичните параметри на горенето.

Използван е софтуерен пакет с отворен достъп Propellant Evaluation Program (**PROPEP-3, версия 1.0.3.0**). Програмата използва данните за началните реагенти (въглеродороди, окислители, газове, инертни вещества и др.), решава математическа система, която минимизира Гибсовата свободна енергия на сместа при зададени налягане/температура и изчислява полученото равновесно разпределение на продуктите при тези условия.

2. Методи за получаване на образци от ТРГ.

Подготовката на тестови образци от ТРГ е изключително деликатен процес и се извършва при строго контролирани лабораторни условия със спазване на всички необходими мерки, свързани с безопасността. Предварителните оценки за характеристиките на материалите, получени от данните на моделните симулации, са използвани за теоретично предсказване поведението на всеки отделен вид ТРГ. В лабораторните помещения са използвани защитни екрани, индивидуални предпазни средства и надежден мониторинг на температура, влажност и рискове от електростатични заряди. За предотвратяване натрупването на потенциално вредни газове или прах са използвани подходящи системи за вентилация.

A. Получаване на образци от карамелно гориво калиев нитрат - изомалт

Двете прахообразни съставки, необходими за горивото, са претегляни на аналитична везна в съотношение 65/35 тегловни проценти (окислител/гориво) и са смесвани чрез механична бъркалка до хомогенизиране на сместа. В зависимост от количеството на готовата смес, за разтопяване са използвани дебелостенни съдове от алуминий с незалепащо покритие и дръжка. При постоянен контрол на температурата и внимателно разбъркване горивната смес е загрявана с термостат до температура 140-150°C. При достигане на температура около 120°C изомалтът започва да се разтопява и

се получава гъста каша, в която се диспергират частиците на окислителя. С продължаващо нагряване стопилката постепенно намалява вискозитета си и става почти прозрачна и течлива при зададената крайна температура. Тази лекоподвижна стопилка се излива в предварително подготвени калъпи с желаната форма - за тестови пръчици обикновено 10/100 mm (цилиндрични или с форма на паралелепипед), а за горивни заряди според предварително изчислени размери. По аналогичен начин са приготвяни и образците КН/глюкоза; КН/фруктоза; КН/лактоза; КН/сорбитол; КН/захар; КН/ксилитол; КН/манитол и КН/еритритол. Особеност при подготовката на гориво КН/сорбитол е, че образците се нуждаят от няколко дни до пълно втвърдяване, докато горивото КН-изомалт е напълно втвърдено в рамките на часове (дори минути, при по-малки количества), което е важно предимство. Втвърдява се за по-кратко време и от другите видове карамелни ТРГ (например захарен, фруктозен, глюкозен вариант). Получените тестови образци са поставяни в закрит контейнер до пълното им втвърдяване, след което са подлагани на поредица от анализи.

Б. Създаване на горивни образци на горива с окислителни алкални перийодати

Доставените окислителни (KIO_4 и $NaIO_4$) са с кристална форма на частиците и установени чрез ситов анализ размери в диапазона 50÷150 μm . За влагане в горивната матрица те са допълнително раздробявани в малка лабораторна мелница до размер на частиците <60 μm . Приготвянето на образците става чрез ръчно смесване на компонентите, като първоначално се хомогенизират епоксидната смола и втвърдителя, след което се добавят прахообразните компоненти (първо метала, след това добавките и накрая окислителя). Получената пастообразна маса позволява лесно формование в различни по форма и големина калъпи. Втвърдяването на тази смес настъпва за около 6 часа при температура от 50°C. За измерване на скоростта на горене при атмосферно налягане бяха приготвени цилиндрични образци с диаметър 11 mm и дължини 80÷120 mm. За изследване на плътността и физико-механичните показатели, образците бяха изработени с призматична форма. Тази геометрия позволява точно определяне на геометричните размери и обема, както и осигурява подходящи условия за провеждане на механични изпитвания при равномерно натоварване.

3. Методи за аналитичен контрол на горивните съставки и готовите образци.

С цел повишаване на аналитичната резолюция, систематичното изпитване на образците от ТРГ бе сегментирано в следните основни тематични групи:

1. *Изследване на гранулометрията.*
2. *Физични параметри.*
3. *Тестове за хигроскопичност при атмосферни условия.*
4. *Термичен анализ и стабилност: TG, TGA, DSC.*
5. *Механични и деформационни свойства:* Тест на опън; Криви на огъване; Критично натоварване на разрушение.
6. *Горивни/вътрешнобалистични тестове:* Тестове за скорост на горене при атмосферно налягане; Серийни статични огневи изпитания в моделни двигатели.
7. *Тестове за чувствителност и безопасност (EN 13631-1:2025):* Тест за удар (drop-weight / BAM impact test); Тест за триене (BAM friction test)
8. *Съвместимост и корозия:*
9. *Стареене и устойчивост при съхранение:*
10. *Изпитвания за екологични емисии и остатъци:* Анализ на продуктите от горенето (СТ на СИВ 2103:1980); Контрол на остатъчни материали и шлакове след изгаряне
11. *Елементен анализ.*
12. *Полетни изпитания.*

II. Резултати и дискусия

1. Получаване и характеристики на ракетно гориво калиев нитрат/изомалт

Внимателният анализ на извършения задълбочен литературен обзор показва, че ТРГ от така наречения **карамелен тип** (система окислител - захарид) са възможен и подходящ избор за условията на университетска среда, тъй като се използват концептуално прости и добре познати вещества. Едновременно с това се установи, че има конкретна горивна композиция от карамелен тип, а именно комбинацията от горивен компонент **подсладител изомалт (Isomalt) и окислител калиев нитрат (КН, KNO_3)**, за която липсват публикувани данни, описващи поне в задоволителна степен нейните характеристики. Поради тези причини голяма част от експерименталния раздел на този дисертационен труд е насочена към провеждане на детайлно и систематично емпирично изследване с цел: установяване на физико-химични, механични, балистични и енергетични характеристики на горивото калиев нитрат/изомалт.

1.1. Софтуерно моделиране на термохимичните превръщания и прогноза за енергетичното представяне на гориво КН/изомалт (65/35%).

За предварителното моделиране на процесите при термохимичните превръщания и изчисления на основните търсени параметри на горивото КН/изомалт е използван софтуерния пакет с отворен достъп PROPER-3. Необходимите входни данни се извличат автоматично от файл, наречен **percoded.daf**, който е текстов файл, съдържащ химичните формули на реагентите, тяхната „топлина на образуване“ ($Q_p = \Delta H_f$, при постоянно налягане) и плътността им. В конкретния случай, в програмата липсват данни за веществото изомалт и затова е направена актуализация на този ключов файл (percoded.daf) с ръчно въвеждане от екипа на необходимите константи (в специфичния изискван от програмата формат), за да могат да бъдат извършени изчисленията.

Получени са точни данни за количеството грам атоми на отделните елементи, теоретично изчислената плътност на горивото $\rho = 1,8741 \text{ g/cm}^3$, температурата в камерата на горене (1509 К), броя на молекулите газ (2,443) и броя на молекулите продукти в кондензирана фаза (0,320), които могат да бъдат твърди или течни. От тези данни може да се изчисли масовата фракция на всяка съставка чрез броя молекули, умножени по молекулното тегло на тази съставка (Табл.1).

Таблица 1. Преизчисляване от молекули към масови дялове

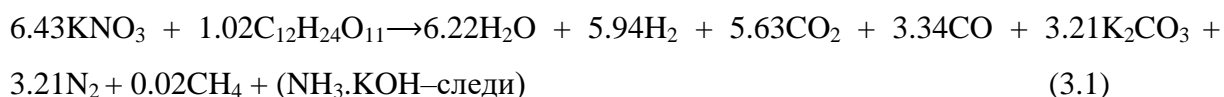
Вещество	Молекули (mol)	Молярна маса (g/mol)	Маса (g)	Масов дял
H ₂ O	0.6223177	18.015	11.21	0.111
H ₂	0.5943002	2.016	1.20	0.0119
CO ₂	0.5633098	44.01	24.79	0.246
CO	0.3334831	28.01	9.34	0.0925
K ₂ CO ₃	0.3214234	138.205	44.41	0.440
N ₂	0.3213767	28.014	9.00	0.0892
CH ₄	0.001511287	16.043	0.0242	0.00024
NH ₃	$7.446706 \cdot 10^{-5}$	17.031	0.00127	$1.26 \cdot 10^{-5}$
KOH	$5.12795 \cdot 10^{-6}$	56.11	0.000288	$2.85 \cdot 10^{-6}$
Общо	–	–	100.00	1.000

Тази част от софтуерно представените резултати дава ключова качествена и количествена информация относно продуктите на горене и фазовото им състояние. Това са много полезни данни за съставяне на екологична оценка за емисиите на горивото и евентуалното наличие на токсични продукти в микса, получен при изгарянето му. Въз основа на резултатите за термодинамичното равновесие на входа и изхода на горивната система беше изчислен кислородният баланс (ОВ) на твърдото ракетно гориво калиев нитрат/изомалт. Стойността му (ОВ = -14.94%) показва

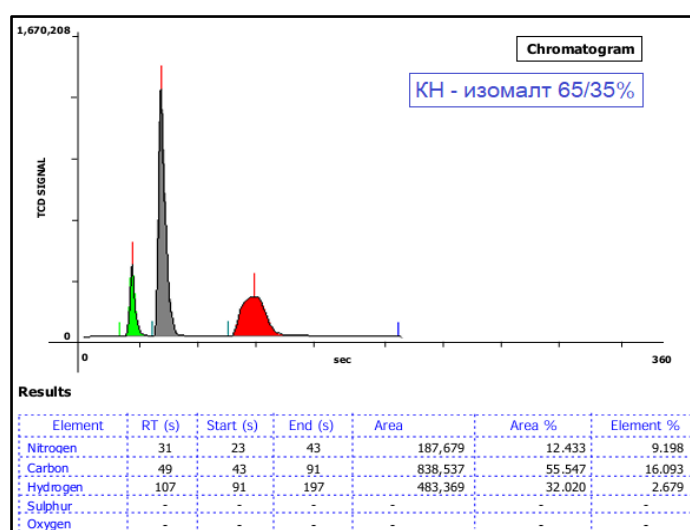
отрицателен кислороден баланс в граници, характерни за много от използваните в практиката ТРГ. Предвижданият идеален специфичен импулс е $I_{SP} = 145$ s. Това е ключов „критерий“ за потенциал на производителност на горивото. Той свързва тягата, произведена от единица маса гориво за време на горене от една секунда. За най-използваните перхлоратни горива е в диапазона $I_{SP} AP / НТРВ \sim 265 \div 270$ s.

1.2. Теоретичен модел за химизма на горивния процес

На база термохимичните превръщания, получени от софтуерния продукт PROPER-3 е съставено химично уравнение на реакциите при горене на ТРГ КН/изомалт. Като изходни компоненти в него участват изомалт ($C_{12}H_{24}O_{11}$) в ролята на гориво и калиев нитрат (KNO_3) като окислител. Предложеното стехиометрично уравнение отразява разпределението на получаващите се химични съединения - газове продукти и остатъчни соли в кондензиран вид:



За валидиране на предложения теоретичен модел на химичните превръщания при горенето, образци от горивото КН/изомалт бяха подложени на елементарен анализ, който дава сведения за количествените дялове на елементите въглерод, водород и азот. Този тип анализ предоставя информация само за количеството на елементите, без да разграничава конкретните химически съединения, в които те участват. На хроматограмата от Фиг. 1 са представени резултатите от това изследване:



Фиг. 1. Хроматографски NCH анализ на гориво КН+изомалт 65/35%.

От данните в хроматограмата се отчитат дяловете на елементите: въглерод C = 16.093 %, водород H = 2.679 % и азот N = 9.198 %. Важно е да се отбележи, че направеният хроматографски анализ не отчита оксидирани и редуцирани форми на въглерода и водорода, както и не дава информация за кислорода и различните калиеви съединения. Проверка на съответствието между данните от хроматограмата и теоретичния модел, предложен от софтуера показва добро съгласие (Табл. 2).

Таблица 2. Сравнителни данни за елементния състав на гориво КН/изомалт.

	Масов процент NCH анализ	Масов процент. изчислен от уравнението	Съответствие
C	16.093 %	15.9 % (от CO ₂ , CO и K ₂ CO ₃)	Добро съгласие
H	2.679 %	2.7 % (от H ₂ O и H ₂)	Отлично съгласие
N	9.198 %	9.15 % (от N ₂)	Отлично съгласие
O	–	Включен в CO ₂ , CO, H ₂ O, K ₂ CO ₃ . KOH	Хроматограмата не дава информация
K	–	Включен в K ₂ CO ₃ и KOH	Хроматограмата не дава информация

Масовият баланс на елементите потвърждава че предложеното стехиометрично уравнение е **реалистичен теоретичен модел на процеса.**

1.3. Проведени анализи на ТРГ от КН/изомалт

Визуален контрол

Образците са проверявани визуално за видими дефекти, шупли, пукнатини и други видове нееднородности. При съмнение за наличие на такива дефекти образците са връщани за повторно отливане. Тази възможност за повторно разтопяване и формоване на вече приготвени отливки е едно от полезните предимства на този тип твърди горива.

Определяне на реално получената плътност

Използван е гравиметричен метод, при който се измерва масата на образеца с аналитична везна и се изчислява обемът на базата на реалните геометрични размери. за директно сравнение между експериментално получената плътност и теоретично изчислената стойност, което е важно за установяване на степента на уплътняване и наличието на вътрешна поръзност. Получените резултати са представени в Табл. 3.

Таблица 3. Получени резултати за реална плътност на образци от ТРГ КН/изомалт

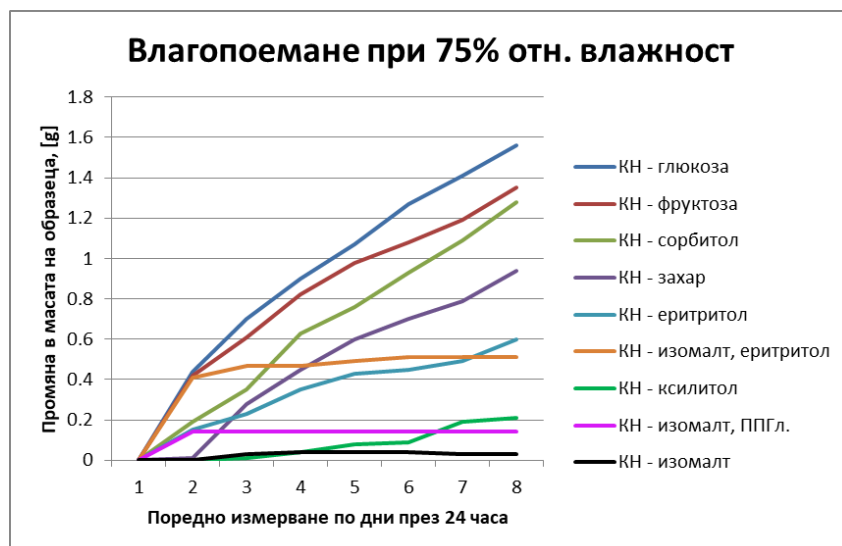
Образец	Маса m (g)	Обем V (cm ³)	ρ_{exp} (g/cm ³)	ρ_{th} (g/cm ³)	η (%)
1	15.90	8.74	1.82	1.8741	97.2
2	15.18	8.25	1.84	1.8741	98.0
3	14.37	7.85	1.83	1.8741	97.6

Средната експериментална плътност на образците е $\rho_{\text{exp}} = 1.83 \text{ g/cm}^3$, което съответства на относителна плътност $\eta = 97.6\%$. Наблюдаваното отклонение от теоретичната плътност се свързва с възможна остатъчна порьозност, формирана по време на процеса на втвърдяване.

Влагопоемане и хигроскопичност

Оценявана беше хигроскопичността на образците посредством статичен гравиметричен метод. Те бяха поставяни в ексикатор, на дъното на който бе зареден наситен воден разтвор на натриев хлорид. При тези условия вътре в него бе получена относителна влажност с постоянна стойност 75% при температура 22°C. Измервана бе масата на сухите образци от горива през периоди от 24 часа до достигане на равновесие (три поредни измервания без промяна на масата им). Сорбционните способности на различните образци са пресмятани като процентна промяна на масата им. За сравнение на хигроскопичността на горивото КН-изомалт с другите приготвени образци карамелни горива (в същото съотношение, 65/35%) бяха направени експерименти с поставяне на образци от различни горивни състави в ексикатора.

На Фиг. 2 е представена диаграма, която дава визуална представа за тренда в хигроскопичното поведение на изследваните горивни състави.



Фиг. 2. Хигроскопично поведение на различни карамелни ТРГ при отн. влажност 75%.

Видно от получената база данни е почти линейната зависимост на влагопоемане във времето при повечето горивни комбинации. Изключение правят горивните рецептури с изомалт, еритритол и ксилитол, при които се наблюдава насищане в нивата на поемана влага. Относителната промяна в масата на горивата е убедително най-ниска при рецептурите с изомалт, следвани от тези с ксилитол и еритритол. Най-чувствителни при тези нива на влажност са глюкоза, фруктоза и сорбитол, следвани от захарта.

Влагопоемането при условия на престой в атмосферни условия е изследвано чрез престой на открито на 2 броя образци от горивото КН-изомалт в продължение на 25 дни. Това осигурява динамичен режим на контакт с околния въздух, но при осигурена защита от валежи директно върху тях. През целия период на този тест температурата на въздуха се колебае в интервал (-14 ÷ +12 °C), относителната влажност е в границите 51 ÷ 93 %, а атмосферното налягане в рамките на 101 ÷ 102.8 kPa. За целия период на направените измервания максималната промяна в измерената маса представлява по-малко от 1% спрямо първоначалните им стойности.

Горивната комбинация КН/изомалт демонстрира много висока устойчивост към овлажняване и по-добра стабилност при съхранение в сравнение с останалите изследвани карамелни състави. Така горивото се оценява като изключително непретенциозно към условията на работа, от неговото получаване, през процесите на експлоатация и при необходимост от по-дълго съхранение.

Якостни характеристики

От якостните показатели на горивото са изследвани якостта на опън (σ_t) и якост на огъване. на каквито натоварвания най-силно са подложени горивните заряди при работа под налягане в ракетните двигатели. Крехките материали по-добре понасят натоварвания на натиск и по-слабо издържат на опънови усилия и огъващи моменти.

В резултат на измерванията и получените данни е определена стойност $\sigma_t = 6.84$ МПа. За сравнение, композитните горива със свързващо вещество НТРВ се характеризират с по-ниска якост на опън (обикновено под 3 МПа), докато двуосновните и СМДВ горивата показват значително по-високи стойности, достигащи 10–15 МПа, за сметка на по-ниска деформируемост. Модулът на Юнг E е изчислен чрез измерване на провисването на свободния край (контролна точка М) под действие на сила (F). По този начин е получена стойност $E = 5.81$ GPa. След изчисленията за модула на еластичност, е определено и граничното напрежение на разрушаване ($\sigma_{гр}$). При направеното експериментално измерване на пречупващата сила на огъване за три различни образеца с еднаква дължина са получени три стойности на пречупващото напрежение ($\sigma_1 = 7.65$ МПа ; $\sigma_2 = 6.88$ МПа ; $\sigma_3 = 7.30$ МПа). Чрез усредняване на получените 3 резултата е определено граничното напрежение на огъване ($\sigma_{гр} = 7.28$ МПа).

Определените механични характеристики на изследваното карамелно ракетно гориво, модул на Юнг ($E = 5.81$ GPa) и граничното напрежение на огъване ($\sigma_{гр} = 7.28$ МПа) се намират в диапазон характерен за двубазови и комбинирани (СМДВ) горива (типично $1 \div 5$ GPa. и съответно $5 \div 15$ МПа). Те са съществено по-високи от типичните стойности за съвременните композитни горива горива (АР/НТРВ/Al), при които модулът на Юнг обикновено е в интервала $0.1 \div 2$ GPa. а граничното напрежение на огъване в диапазона $1 \div 5$ МПа. Изследваното гориво КН/изомалт притежава **висока коравина и умерена якост на огъване**, което е характерно за по-твърди енергонаситени материали.

Тестове за чувствителност към механични въздействия

Образците от карамелен тип ТРГ бяха подложени на изпитвания за чувствителност на удар и триене, които са основни показатели за оценка на безопасността при работа с енергетични вещества. При тестовете на удар се получава раздробяване на образците, без реакция от типа на запалване, дим, или взривни ефекти. Изпитанията на триене довеждат до локално провлачване на образците, вследствие частично разтопяване на контактната зона. но също не бяха наблюдавани признаци на

реакции. Сравнителни данни за изследваните реакции при въздействие на удар и триене, за различни типове от широко използвани твърди ракетни горива, както и за горивото КН/изомалт са показани в Табл. 4.

Таблица 4. Чувствителност на удар и триене на най-използваните ТРГ и на образец карамелно гориво (КН-изомалт 65/35).

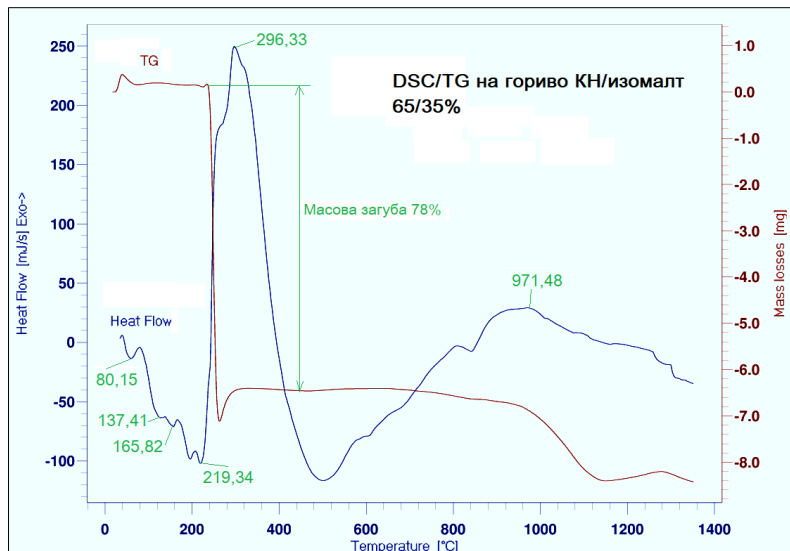
Тип твърдо ракетно гориво	Типичен състав (пример)	Чувствителност към удар. H_{50} (cm)	Чувствителност към триене – F_{50} (N) реакции	Обща оценка на Чувствителността
Балиститни двуосновни	NC/NG ± пластификатори	15 – 40 cm	20 – 60 N или до ~30–50 % реакции	Висока механична чувствителност
Композитни (АР/НТРВ)	АР + НТРВ (без метал)	>50 cm (често >60 cm)	60 – 120 N, обикновено 0 % реакции	Сравнително ниска
Нано-композити	АР/НТРВ + nano-Al	35 – 60 cm	30 – 80 N, до ~20 % реакции	По-висока от тази на стандартните
Карамелно гориво	КН + изомалт 65/35%	Липса на реакция	Липса на реакция	Нечувствително към въздействия на удар и триене

H_{50} – височина на падане, при която има 50 % вероятност от реакция (по-голяма височина = по-безопасно); F_{50} – сила на триене, при която има 50 % вероятност (по-голяма сила = по-безопасно).

Диференциален термичен анализ на образци от ТРГ КН/изомалт

Твърдите горива от типа КН/захарид термично се разлагат по специфичен механизъм - началото на процеса се инициира не от стопяването на горивния компонент (захарид), а от фазов преход в окислителя. Тази характерна особеност е установена и определена от някои изследователи като „контролирано от окислителя разлагане“ на горивната смес.

Високотемпературното разлагане на горивото КН/изомалт е изучено с провеждането на диференциален термичен анализ на образци, изготвени както от чиста горивна смес 65/35%, така и при участието в основния състав на различни технологични добавки. На Фиг. 3 е представена термограма от DSC/TG изследване на горивен състав КН/изомалт в масово съотношение 65/35%.

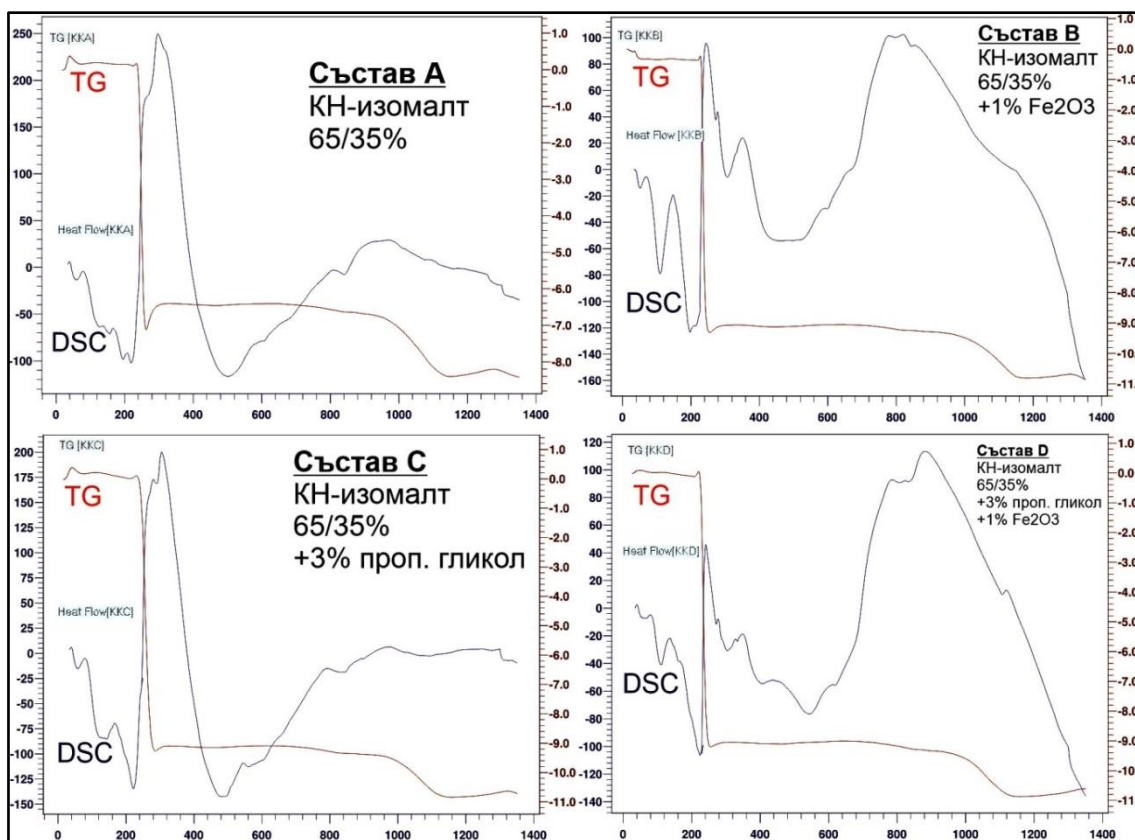


Фиг. 3. Термограма от термично изследване на гориво КН/изомалт.

От анализа на термограмата, е установена температурата на samozапалване на горивото КН/изомалт, която в случая е $T_{\text{зап}} = 240^{\circ}\text{C}$. видно от добре изразената много бърза загуба на маса, регистрирана на TG кривата. От практическа гледна точка, това е свързано с границата на безопасност при работа със стопилка на горивния състав. Температурният диапазон между 145°C (стопяване на изомалта) до 240°C (температура на samozапалване) може да се счита за зона на сигурност при работа със стопилката, но както беше отбелязано по-напред в изложението, над температура от 180°C е възможна частична деструкция на захарида. В този аспект, по-строгото ограничение (180°C) е по-сигурната пределна точка за безопасно боравене със стопеното гориво.

С цел установяване влиянието на някои често използвани **технологични добавки** към основния състав (**A**) на гориво КН/изомалт, са проведени още няколко термични анализи на модифицирани горивни състави. В състав (**B**) към основната формула на горивото е добавен 3% пропилен гликол ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$), с цел намаляване на вискозитета на стопената горивна смес и по-лесно отливане на горивни заряди и образци за анализи. В рецептурата (**C**) е включен и 1% червен железен оксид (Fe_2O_3) като модификатор на скоростта на горене. При състав с означение (**D**) едновременно бяха включени посочените две добавки.

Направеният сравнителен анализ, базиран на резултатите от четирите получени термични изследвания, показва два различни модела в разпределението на топлинния поток (Фиг. 4).



Фиг. 4. Термограми от термични анализи на горивни състави (A), (B), (C) и (D).

Термичното поведение на основното гориво (A) и на състава с добавка само на пропилен гликол (C) се характеризира с първи ясно изразен екзотермичен етап, който съвпада с основната загуба на маса. Това показва бърз термичен разпад, при който разграждането на структурата, газообразуването и прирастът на енергия протичат практически едновременно. Вторичният екзотермичен ефект енергетично е по-слаб, разтеглен във времето и изместен към по-високи температури, което отговаря на доразпад или окисление на остатъчната маса в кондензирана фаза. Добавката на пропилен гликол улеснява газообразуването чрез взаимодействие с полярни функционални групи в горивото и определя сравнително голяма концентрация на топлинния поток в първата част от разпада.

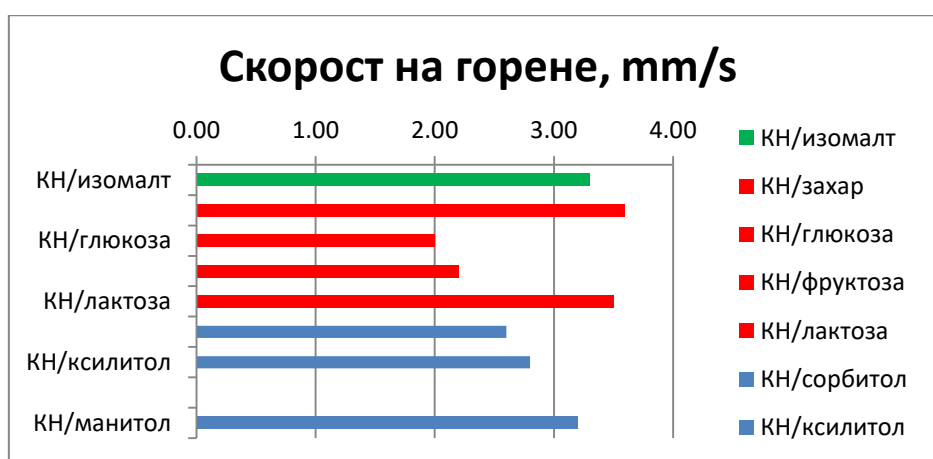
При горивните състави с добавка на железен оксид (B) и (D) основната (ярко изразена) загуба на маса се реализира отново в първия термичен етап, но екзотермичният пик е видимо по-тесен. Това е индикация за реакции, които не са толкова екзотермични. Железният оксид стабилизира междинни продукти и забавя бързите термични разпадни реакции. Получава се бързо газоотделяне, което не носи голям енергетичен прираст. Вторият екзотермичен пик при тези състави е висок, добре дефиниран и значителен, въпреки минималната допълнителна загуба на маса. Това

предполага интензивни реакции в кондензирана фаза, включително доокисление и структурни трансформации. В този температурен диапазон железният оксид катализира тези процеси и концентрира енергийния поток на системата.

Тези наблюдения дават основание да се предположи, че двете добавки не влияят съществено на първоначалната температура на разлагане на основния състав. Те обаче действат по различни механизми върху разпределението на топлинния поток: пропилен гликолят измества енергийния прираст в първата фаза на разпада, докато железният оксид регулира кинетиката и увеличава интензивността на доокислението и структурните трансформации при по-високи температури.

Скорост на горене при атмосферно налягане.

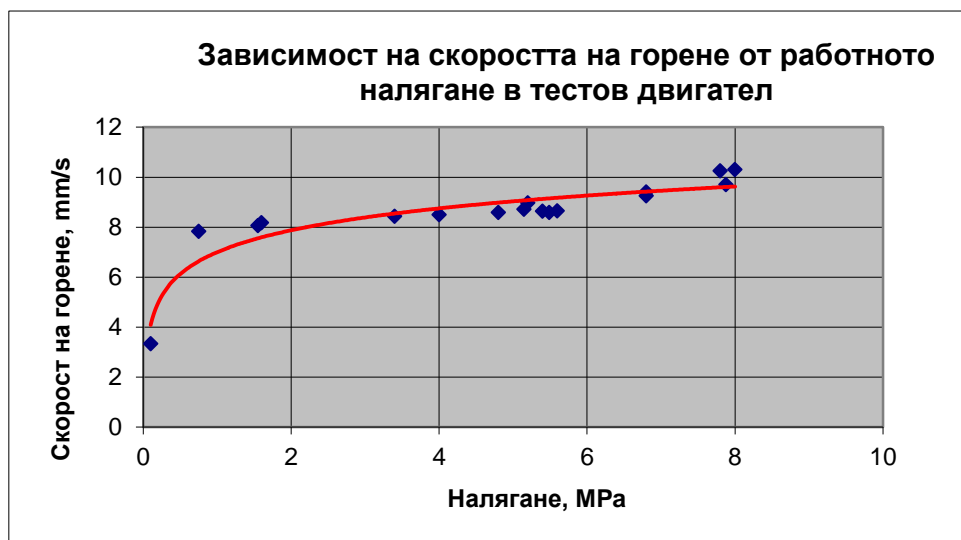
Получената представителна средна стойност (от проведени 5 броя изгаряния) за скоростта на горене при атмосферно налягане и температура на околния въздух 20°C е $r = 3.3 \text{ mm/s}$. Допълнителни тестови изгаряния, проведени при температури на въздуха в диапазона 0÷35°C показват слаба зависимост на скоростта на горене от околната температура (5÷6%). Добавяне на катализатор железен оксид (Fe_2O_3) в количества до 1% към основния състав има силно влияние върху скоростта на горене на въздуха и води до увеличение на стойностите до $r = 4.0\div 5.0 \text{ mm/s}$, което в проценти е +20÷50%, в зависимост от точното количество на добавката. За сравнителна оценка, са направени измервания за скорост на горене на още 8 вида горивни комбинации между КН и други захариди в същото съотношение (65/35%, мас.). (Фиг. 5).



Фиг. 5. Сравнителна графика за скорост на горене на въздуха на КН/захариди.

Вътрешнобалистични изпитвания

Проведени бяха общо 16 броя тестови изгаряния в малък моделен двигател, който позволява настройка на работните параметри за всеки отделен тест и надеждно измерване в лабораторни условия. За всеки от 16-те реализирани теста е извършена предварителна числена симулация на вътрешнобалистичния процес с помощта на електронната таблица **SRM Excel**, която е изчислителен модел създаден от канадския учен Ричард Накка. На база на тези симулации са направени сравнителни анализи между модела и действително направените измервания. След проведените тестове и обработка на всичките получени стойности за измерваните параметри се пристъпи към изчисление на търсените емпирични величини, а именно ключовите коефициенти в степенния закон на горене ($r = a \cdot p^n$). където r е линейната скорост на горене, mm/s; p — работното налягане, МРа; n — степенният показател; a — емпиричен коефициент, характеризиращ поведението на конкретното гориво. Резултатите от обработката на събраната база тестови данни и получената апроксимационна крива са представени графично на Фиг. 6.



Фиг. 6. Гориво КН/изомалт - експериментални данни от 16 тестови изгаряния.

Характерът на получената апроксимационна крива е типичен за повечето ТРГ от карамелен тип, за които има публикувани емпирични изследвания. Характерно за тях е специфично „двурежимно“ поведение - в първоначалния участък (от атмосферно налягане до приблизително 1 МРа) скоростта на горене нараства много бързо и достига значителна част от средната работна стойност. По-нататъшното повишаване на налягането води само до умерено увеличение на скоростта, кривата е със слаб наклон и придобива плато-подобен характер.

В резултат от направените изчисления, в нашето изследване е получена стойност за степенния показател $n = 0.21$, а за коефициента $a = 6.51 \text{ mm}/(\text{s.MPa}^{-n})$. Стойността на „ n “ е близка до публикуваните за други подобни състави от захариден тип и по-ниска от типичните за повечето композитни горива, което отразява относително ниска чувствителност на скоростта на горене към налягането в този баричен диапазон.

При статичните тестове са получени данни за създаваната тяга от моделния двигател, чрез които са изчислени стойностите на пълният импулс при всяка отделна конфигурация на зареждане. В зависимост от използваното количество гориво за всеки тест са направени изчисления на постигнатия реален специфичен импулс. Получените резултати са в границите $I_{sp} \approx 124\div 132 \text{ s}$. Тези стойности са малко по-високи от докладваните от други автори за горивен състав КН/сорбитол, и малко по-ниски от реалните стойности, получавани за горивна комбинация КН/глюкоза.

Съвместимост и корозия

Проведени са експериментални и аналитични изследвания за оценка на съвместимостта на образци от гориво КН/изомалт с конструкционните материали на двигателите, материалите за вътрешна топлинна защита и контактните зони, при статични условия и при динамични натоварвания.

При статични условия на престой от 6 месеца на образци гориво, бронирани с изолационни клингерити, не са установени признаци на промяна и взаимодействие между тези материали и самото гориво. Корозионно влияние е регистрирано от продуктите на изгаряне на горивото след провеждане на горивни тестове. Проявява се върху метални детайли от въглеродни стомани и алуминиеви сплави с развитие на корозионни процеси при неефективно почистване на детайлите след употреба.

При динамични натоварвания (по време на отработване на горивото) доминиращо значение имат високите температури и въздействието на продуктите от горенето. Основният кондензиран продукт след горене на карамелни горива е калиевият карбонат (K_2CO_3), който се отлага по вътрешните повърхности на корпуса и особено в областта на сопловите части. Тези реакции (както при алуминиевите, така и при стоманените детайли) водят до загуба на защитния оксиден слой. В сопловите участъци комбинираното действие на висока температура, ерозия от газовия поток и отлагания на K_2CO_3 води до ускорено износване и деградация на материала. Съвместимостта на карамелните твърди ракетни горива с материалите на двигателите се определя от различни, но управляеми механизми при статични и динамични условия.

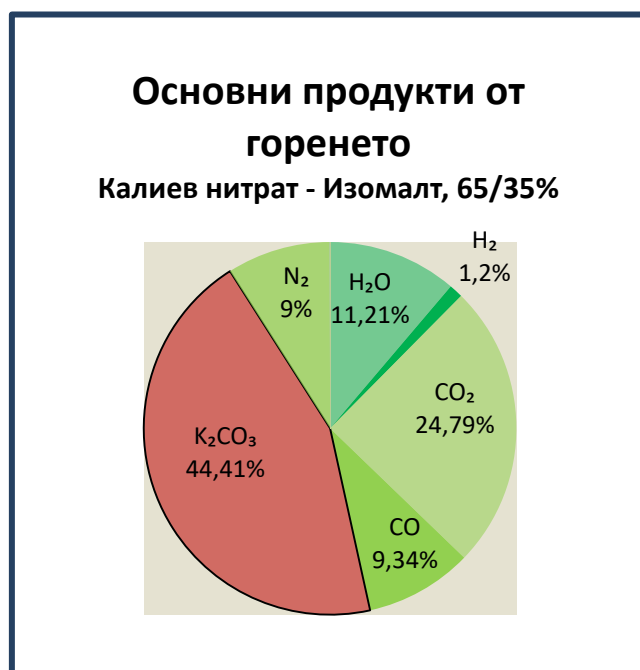
Старене и устойчивост при съхранение

Проведени са анализи и контролни изпитвания на образци от карамелни ТРГ със състав КН/изомалт след престой от 2÷3 години при лабораторни условия, при температура 20÷25°C и влажност 50÷6-%. Подложени са на анализи за химическа стабилност, промени във физико-механичните им свойства и работоспособността им.

Следена бе промяната в рН, което остава постоянно; не са наблюдавани промени в цвета. повърхностна крехкост, напукване, локални уплътнени или втвърдени участъци и кристализирани частици. Не са установени начални процеси на разлагане като отделяне на газове или локални химични промени в матрицата. Твърдостта и еластичността на образците остават в рамките на ± 10 % спрямо началните стойности. Скоростта на горене и пламъчните характеристики се запазват в рамките на ± 10 % спрямо номиналните стойности, без признаци на нестабилно или аномално поведение.

Аналитични и експериментални изследвания на емисиите

Поради относително ниската температура на горене в сравнение с други високоенергийни твърди горива, значителна част от калиевите съединения кондензира под формата на твърди или аерозолни частици, основно калиев карбонат (K_2CO_3). От задълбочения модел на протичащите реакции, направен чрез софтуерната програма PROPER-3, е получена количествена характеристика на образуващите се продукти при горене, която е представена във вид на диаграма на Фиг. 7.



Фиг. 7. Масово разпределение на продуктите от горене на ТРГ КН/изомалт.

Теоретичният баланс на продуктите показва, че газовата фаза е доминирана от H₂O, CO₂, H₂ и N₂, като CO се образува в резултат на непълно окисление. Кондензираната фаза е представена основно от K₂CO₃.

Чрез газова хроматография бе установено разпределението на газовите компоненти (в масови проценти. Табл. 5).

Таблица 5. Масови дялове на газовия микс при горене на гориво КН/изомалт

Газ	Маса (g)	Масов дял (%)
CO ₂	24.79	44.6 %
H ₂ O	11.21	20.2 %
CO	9.34	16.8 %
N ₂	9.00	16.2 %
H ₂	1.20	2.16 %
CH ₄	0.0242	0.044 %
NH ₃	0.00127	0.002 %
Общо	55.57	100.0 %

Експериментално изследване на емисиите е проведено в лабораторни условия чрез анализ на изходящите продукти, образувани при изгаряне на образец от горивото. Лабораторните анализи (ПРОТОКОЛ № 5 - 0073 / 05.12.2023 г. на „Евротестконтрол“) показват добра съгласуваност с теоретичния модел Табл. 6).

Таблица 6. Резултати от изпитването : Лабораторен № 2316718

Данни за пробата: № на пробата:1. взета от газова смес, отделена след изгаряне на Образец #1. Образецът е смесево твърдо ракетно гориво от карамелен тип, съставено от 65% калиев нитрат (KNO ₃ ч.з.а.) и 35% подсладител Изомалт C ₁₂ H ₂₄ O ₁₁ . (Veneo, тип ST-PF).				
№ по ред	Наименование на характеристиката	Стандарти валидирани методи	Единица на величината	Резултати от изпитването (стойност, неопределеност)
1	2	3	4	5
1	Компонентен състав:	СТ СИВ 2103:1980		
	Азот (N ₂)		%	16
	Водород (H ₂)		%	2
	Кислород (O ₂)		%	19
	Въглероден диоксид (CO ₂)		%	42
	Въглероден оксид (CO)		%	18
	Метан (CH ₄)		%	<0.05

Проведените аналитични и експериментални изследвания показват, че емисиите са добре предсказуеми чрез термохимично моделиране. Те се характеризират с отделяне на газообразни продукти с ниска молекулна маса (CO₂, H₂O, CO, N₂, H₂).

характерни за ТРГ и следи от метан, които не представляват съществен риск за здравето или околната среда при нормални условия на изгаряне. Липсва съдържание на хлорни съединения.

Възможен подход за утилизация на гориво КН/изомалт (концептуално).

Разтворимостта във вода на двата компонента в така изследваното ТРГ, би могла да се използва като възможност за разработка на иновативен технологичен процес за утилизация на такива горивни заряди.

В експериментален план е направен тест за разтваряне във вода на готов заряд от гориво КН/изомалт с типична цилиндрична форма и вътрешен канал, който е бил подготвен за един от горивните тестове преди това. Зарядът с нетна маса 120 g, облицован от външната си страна с многослойна хартиена „бронировка“, беше поставен в съд с 500 ml чешмяна вода при температура от 15°C. След престой от 12 часа се отчете пълно разтваряне на горивото, при статични условия (без принудително разбъркване). Отчетената стойност за рН на получения разтвор е $pH = 6 \div 6.5$, което е близко до неутралната стойност (всъщност, леко кисел, но вероятно заради използването на чешмяна вода и открит съд за разтварянето).

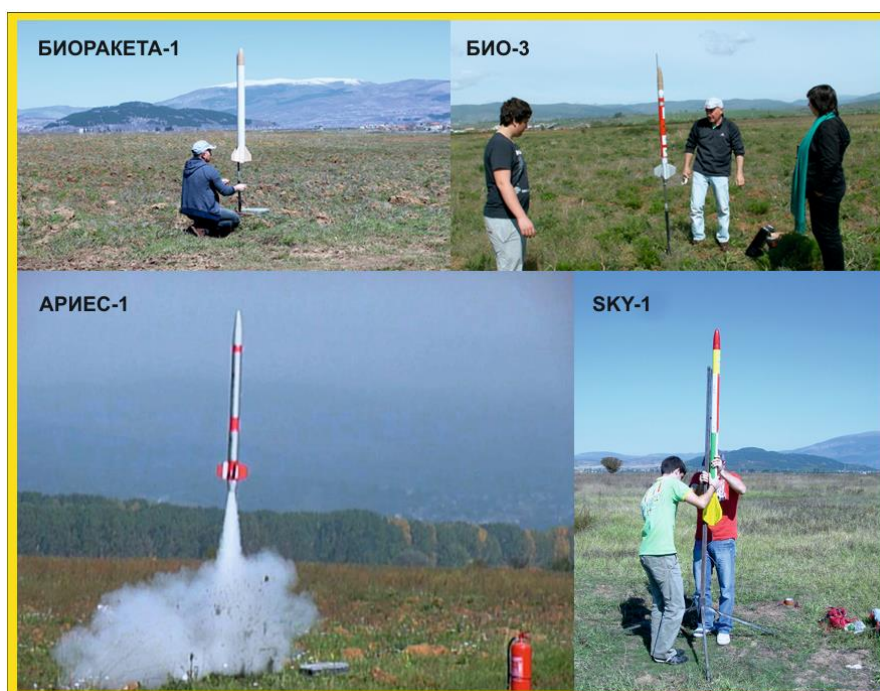
Основният научен и технологичен предизвикателен аспект е да се постигне функционална промяна, която прави продукта окончателно неспособен да участва в окислително-горивни реакции. Ако се осигури гарантирана екологична стабилност на системата, без нежелана миграция на нитросъединения или непредвидени микробиологични ефекти, то е възможна реализацията на този сравнително прост вариант на утилизация за изследвания вид горива.

Полетни изпитания на гориво КН/изомалт в ракетни модели

Заключителният етап на проведеното емпирично изследване е провеждането на **полетни изпитания на разработеното твърдо ракетно гориво с помощта на действащи ракетни модели**. За целта бяха конструирани ракетни модели, различаващи се по стартова маса (от под 1 kg до над 150 kg), габарити (1÷5 m) и други конструктивни особености. Изборът на конкретните параметри на ракетите е целенасочено съобразен с възможните области за тяхното бъдещо приложение.

Основните критерии, по които се оценяваше съответствието между прогнозираните и получени резултати бяха височина на полета (достигнат апогей), разпределение на тягата във времето, стабилност на траекторията и общ вид на газовата струя от соплото. следполетен анализ на конструкцията. Чрез систематично

регистриране и следене на тези ключови параметри бяха събрани експериментални резултати в необходимия обем, за да се направят анализи с достатъчна прецизност. Тук са описани получени полетни параметри на 10 различни по маса и конструкция ракети, използващи за гориво заряди от КН/изомалт. Моменти от подготовката на някои от описаните по-долу 10 полети са показани в колажа от Фиг. 8. Обобщени резултати за стартовата маса, теоретичния пълен импулс на двигателите им, прогнозираната от софтуера максимална полетна височина и реално записаната от бордовите системи достигната височина са дадени в Табл. 7.



Фиг. 8. Подготовка за старт на 4 от експерименталните ракетни модели.

Таблица 7. Сравнителни данни за височина на апогей за всяка от десетте ракети.

№ и име ракета	Стартова маса, kg	Пълен импулс на двигателя, N.s	Прогнозирана полетна височина, m	Реално отчетена полетна височина, m	Коментар за полета
1. Биоракета -1	3.40	360	512	502	Успешен
2. Био - 3	2.61	630	1530	1549	Успешен
3. Ариес -1 (Ултра)	3.50	1150	2035	1960	Успешен
4. SKY 1	4.50	2230	2680	2703	Свръхзвуков полет, 441 m/s
5. GRP - orange	8.50	1050	890	785	Вятър, леко отклонение
6. Ариес - 2	10.50	2370	1840	1409	Силен вятър, отклонение
7. Болид -14	14.00	2550	1360	1345	Успешен
8. Осогово	15.00	2670	1518	1538	Успешен
9. Т. Rex 2	19.00	2800	905	861	Успешен
10. Черешка 2010	175.00	21000	450	413	Успешен

Генералният извод от проведените полети е, че е получено много добро съответствие с моделните предвиждания. Единствените разминавания се дължат на причини, свързани със съпътстващите системи и конструкторски неточности, а не на проблеми в работата на изпитваното гориво.

Като доказателство на тези изводи може да се приложат получените резултати от полетите на други две ракети от сравнителната Табл. 7 - това са **T. Rex 2** и **Черешка 2010** (Фиг. 9). Това са два ракетни модела с рекордни за български граждански проекти параметри. Ракетата Черешка 2010 се нарежда в „Топ-3“ за мащабен любителски проект в европейски контекст, надминавайки типичните студентски ракети от състезания като EuRoC, (маси 80÷90 kg. диаметри 0.2÷0.25 m) и доближавайки се по показатели до проекти като REXUS.



Фиг. 9. Успешно изстрелване на експериментална ракета ЧЕРЕШКА 2010

2. Получаване на ТРГ с окислители алкални (мета)перйодати KIO_4 и NaIO_4

Като втора част от експерименталната програма по темата на дисертационния труд, са проведени изследвания и анализи на втора група композитни ТРГ, които удовлетворяват поставените изисквания за екологичност, нетоксичност на емисии, безопасност на технологичните процеси, достъпност на компонентите и добри енергетични показатели. Още при провеждане на литературния обзор вниманието беше насочено към използване на подходящи химични съединения, сходни по свойства с

перхлоратите и съдържащи елементи от халогенната група. Подходящи за целта вещества са алкалните (мета)перйодати KIO_4 и $NaIO_4$, които съдържат йода в най-високата му степен на окисление (+7). Те са описвани като стабилни химични съединения с висока молекулна маса, окисоли на перйодната киселина. Установено е, че при нагриване се разлагат с отделяне на кислород. Под действието на редуциращи агенти, перйодатният йон IO_4^- лесно се редуцира до йодат или йодид, което показва силен окислителен характер.

Според анализите от литературния обзор, стана ясно че в последните години има разработени разнообразни варианти на пиротехнически състави, в които се включват алкални перйодати в ролята им на „зелени“ окислители с цел замяна на калиев перхлорат и бариев нитрат. Не са открити обаче, никакви публикувани данни, описващи научни изследвания за употреба на перйодатите като окислители за твърди ракетни горива.

2.1. Формулиране на горивни рецептури

Като базов модел за изграждане на рецептурна концепция за този нов тип ТРГ, включваща алкалните перйодати като окислители, са използвани предишни разработки на авторите. Спазено е изискването за използване на компоненти, които не са предмет на специален режим на достъп. Бяха създадени и подложени на анализи 8 конкретни разновидности на композитни горивни състави. Точното процентно разпределение на реагентите (в масови части) с означения от PI-1 до PI-8, са представени в Табл. 8.

Таблица 8. Състав на изследваните композитни твърди горива в мас. %.

Образец	KIO_4	$NaIO_4$	Al	S	C	Изомалт	Fe_2O_3	Епокси	Полиуретан
PI-1	70	-	7	5	-	-	-	18	-
PI-2	-	75	6	4	-	-	-	15	-
PI-3	70	-	-	-	-	15	+0.1	15	-
PI-4	-	70	-	-	-	10	+0.1	20	-
PI-5	35	38	7	5	+2	-	-	15	-
PI-6	35	38	7	5	-	-	-	15	-
PI-7	75	-	10	-	-	-	+0.1	-	15
PI-8	-	75	10	-	-	-	+0.1	15	-

2.2. Моделиране на горивните процеси

Термохимичното моделиране на горивното поведение на експерименталните твърди горивни състави се извърши с използване на програмния продукт с отворен достъп PROPER 3. Тъй като перйодатните съединения не са включени в стандартната термодинамична база данни на тази програма, необходимите физико-химични характеристики бяха въведени ръчно от екипа. Тези данни са интегрирани във входния файл PERCODED.DAF, което позволи включването на перйодатите в изчислителната процедура. Изчислените експлоатационни параметри и прогнозираният състав на продуктите на горене за горивни състави **PI-1, PI-2, PI-5, PI-6** са предствени в Табл. 9. Симулациите са насочени към тези горивни. поради установените им по-високи скорости на горене при изпитванията на открито.

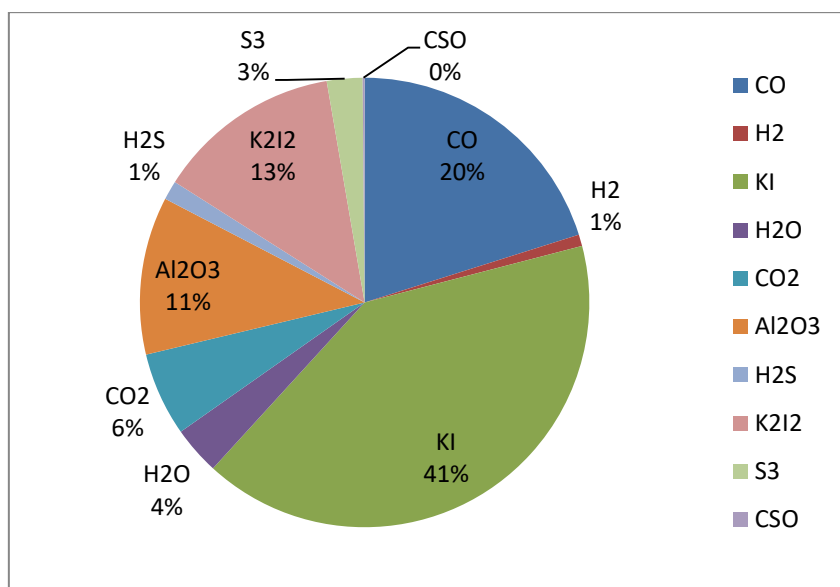
Таблица 9. Резултати за състави PI-1, PI-2, PI-5, PI-6, получени от софтуера.

	Специфичен импулс $I_{sp} \cdot S$	Плътност. $g \text{ cm}^{-3}$	Температура в камерата $T_{ch} \text{ (K)}$	Температура на изход $T_{ex} \text{ (K)}$	Молекулна маса (ср.) на продуктите от горене	Продукти на горене
Състав						
PI-1	159.5	2.6108	2584	1471	52.00	CO, H ₂ , KI, Al ₂ O ₃
PI-2	161.0	2.7041	2732	1837	49.26	CO, H ₂ , NaI, H ₂ O, CO ₂ , Al ₂ O ₃
PI-5	161.1	2.6035	2542	1556	47.30	CO, H ₂ , KI, NaI, H ₂ O, CO ₂ , Al ₂ O ₃
PI-6	161.6	2.6325	2643	1699	49.84	CO, H ₂ , KI, NaI, H ₂ O, CO ₂ , Al ₂ O ₃

Стойностите на теоретично изчисления специфичен импулс на тези четири състава не са високи и са сравними с тези на популярните карамелни твърди ракетни горива, включително изследваното тук гориво калиев нитрат/изомалт. Високата плътност на създадените перйодатни горива е фактор, който компенсира донякъде не много високия специфичен импулс. Сравнени с класическите състави от амониев перхлорат, алуминий и полибутадиенов каучук с крайни хидроксилни групи, (чиято плътност е от порядъка на 1.8 g/cm^3), перйодатните горива ги превъзхождат по този показател с над 30 % (средна плътност 2.5 g/cm^3).

Много важна тяхна характеристика, видама от направения термодинамичен модел на горене, е липсата на вредни емисии от хлор и хлорни съединения при изгарянето им. Съединенията на йода, които се получават при горенето, са класифицирани като по-слабо вредящи на околната среда и организмите, отколкото хлорните. Получени са стойности за теоретична плътност и разпределението на отделните химични елементи в състава на горивата, температурата и налягането в горивната камера, общото съотношение между газовата и кондензираната фаза на всички реагенти, както и разпределението им по вещества и елементи.

Кръговата диаграма (Фиг. 10), изразява количественото разпределение на десетте продукти от горенето с най-големи дялове при горивен състав PI-1.



Фиг. 10. Процентно разпределение на продуктите от горенето на състав PI-1.

Получени са данни за очаквания идеален специфичен импулс ($I_{sp} = 159.5$ s) и характеристичната скорост на изтичане от двигателя ($C^* = 3194.6$ ft/s) на този състав. Както вече беше посочено, стойността на идеалния специфичен импулс е много близка до получените за карамелни твърдогоривни състави, а скоростта на изтичане е с малко по-висока стойност.

По същия начин са моделирани термохимичните превръщания и за другите изследвани горивни състави.

2.3. Тестове за горене на образците при атмосферно налягане

Тъй като моделирането не може да даде сведения за реалната скорост на горене при атмосферно налягане (и дори да предвиди дали изобщо ще има горене), то

необходимите тестове за получаване на тези данни са проведени експериментално.

Резултатите от тях са систематизирани в Табл. 10. а характерът на горенето на един от спесимените може да се види на кадрите от Фиг. 11.



Фиг. 11. Горивен образец с диаметър $\varnothing 11$ мм (а); горене при атмосферно налягане (б); газоотделяне, оцветено в лилави тонове (в).

Таблица 10. Данни за плътността и за горивните свойства при атмосферно налягане

	Теоретична плътност, [g/cm ³]	Реална плътност, [g/cm ³]	Отношение, %	Скорост на горене, [mm/s]	Запалване от открит пламък	Количество твърд остатък
Състав						
PI-1	2.6108	2.5664	98.3	2.2	лесно	**
PI-2	2.7041	2.6473	97.9	3.1	лесно	**
PI-3	2.3537	2.2525	95.7	0.76	лесно	*
PI-4	2.3543	2.2695	96.4	0.72	лесно	*
PI-5	2.6035	2.5410	97.6	1.32	мудно	**
PI-6	2.6325	2.5746	97.8	3.85	лесно	*
PI-7	2.5829	2.4847	96.2	1.46	мудно	**
PI-8	2.7389	2.6430	96.5	2.2	лесно	**

* 10-15% събираем и измерен остатък от изгаряне (спрямо масата на образца);

** 16-35% измерен остатък.

Установено е, че запалването чрез открит огън при повечето състави става лесно и преминава в устойчиво интензивно горене с ярък пламък и обилно газоотделяне, оцветено в лилави тонове (Фиг. 11). Усеща се миризма на йод, а след изгаряне остава известно количество твърд шлак във форма на сферични, или издължени гранулки, както и черни сажди от недоокислен въглерод. Най-стабилно и с висока скорост е горенето на съставите, в които са включени алуминий и сяра (PI-1, PI-2, PI-5, PI-6). Рецептурите с включен изомалт показват доста по-ниска скорост на горене. Пробите с

полиуретан като горивосворзващо вещество горят много нестабилно и оставят голямо количество шлак (над 30%. Мас.), свидетелство за непълно изгаряне.

Съставите с натриев перйодат (PI-2, PI-5, PI-6, PI-8) демонстрират по-стабилно и по-буйно горене в сравнение с тези, в които окислител е калиевият перйодат. Те показват по-висока скорост на горене при атмосферно налягане и по-ярък пламък, дължащ се на спектралната емисия на натриевите атоми. При горивните тестове най-добри резултати са регистрирани за състав PI-6, в който участват и двата перйодата като коокислители. При него са отчетени: най-високата скорост на горене, по-малко количество твърди остатъци, много лесна запалимост и бурно газоотделяне.

2.4. Физико-механични свойства

Получените образци от горивни заряди са с видимо много висока твърдост. Направена беше инспекция за наличие на структурни дефекти, като шупли, пукнатини и други видове несъвършенства. Призматичните заряди бяха подложени на якостни тестове и оценка за стойностите на модулите на еластичност и на разрушаване. Беше изследвана хигроскопичността на образците чрез стандартни подходи.

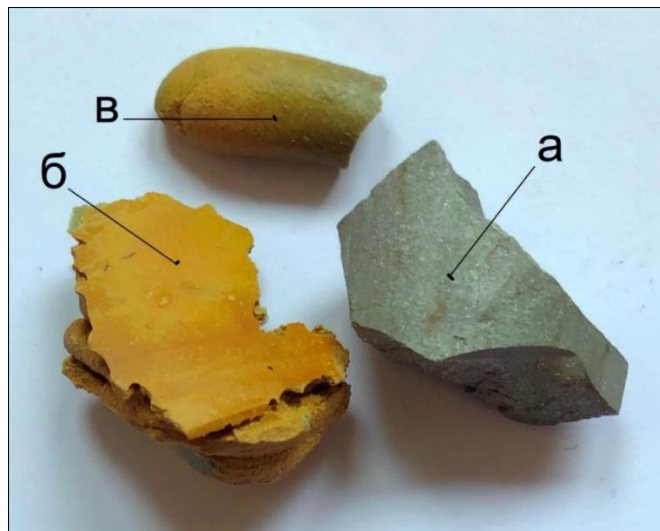
Беше оценявана и чувствителността им на удар и триене по утвърдени методики, при което не бяха отчетени реакции от двата вида въздействия. за оценяваните четири горивни състава (PI-1, PI-2, PI-5, PI-6). Резултатите от тестовете на физико-механичните показатели (якост на опън и на огъване, модул на еластичност, хигроскопичност и чувствителност към механични въздействия) са систематизирани и онагледени в табличен вид (Табл. 11).

Таблица 11. Физико-механични параметри за състави PI-1, PI-2, PI-5, PI-6.

Образец/ параметър	Якост на опън σ (MPa)	Якост на огъване σ (MPa)	Модул на еластичност E (GPa)	Хигроскопичност, мас. промяна, (%)	Чувствителност на удар/триене
PI-1	11.8	8.6	3.81	0.6	Няма реакция
PI-2	10.9	7.9	3.54	1.9	Няма реакция
PI-5	11.6	8.2	4.33	1.4	Няма реакция
PI-6	11.5	8.35	4.51	1.5	Няма реакция

По литературни данни бе установено, че перйодатите притежават в някаква степен фоточувствителност при условия на висока влажност и директна светлина. За изпитване на този феномен бяха оставени образци от горивата при условия на открита светлина и относителна влажност на въздуха 60÷70% в продължение на 3 месеца. В резултат на този тест се оказа, че съставите с участие на натриев перйодат (Фиг. 12- б.в)

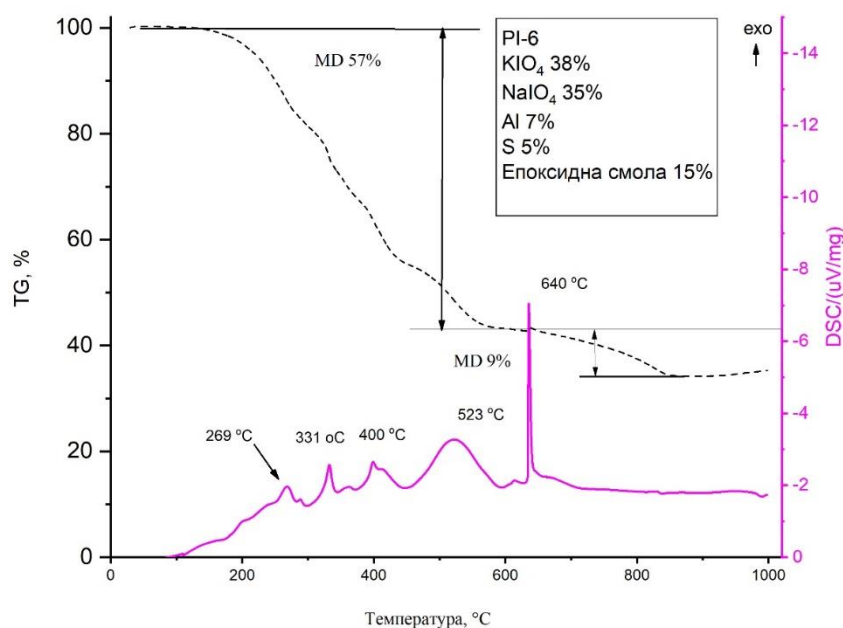
наистина показват повърхностно пожълтяване и характерна миризма на йод, докато тези само с калиев периодат нямаха промяна (Фиг. 12-а). Очевидно се получава сублимация и миграция на йод и йодни съединения към повърхностния слой на горивата при такива условия на съхранение



Фиг. 12. Ефект на повърхностно оцветяване на горивни образци (а- PI-1; б- PI-2; в- PI-6)

2.5. Термокинетика.

За изследване на термичното разлагане на образците (PI-1, PI-2, PI-5, PI-6) и кинетиката на протичащите реакции са използвани термогравиметричен анализ (TG) и диференциална сканираща калориметрия (DSC). Нагряването се проведе в среда от въздух, при нормално атмосферно налягане, в температурния интервал 20-1000°C, със скорост 10°C/min. Термични анализи бяха направени на четири от най-перспективните рецептури, които показаха най-добри показатели, както при симулациите, така и от проведените физически и огневи тестове. Съставите PI-1 и PI-2 се разлагат термично по добре изразен тристъпален механизъм, докато при PI-5 и PI-6 се наблюдава наслагване от термичните ефекти, породени от наличието на двата коокислителя в горивните рецептури. Най-характерно е това поведение при горивен състав PI-6 (Фиг. 13). В TG кривата липсва тристадийният характер при загубата на маса като вместо това се наслагват отделните етапи, отчетени при разлагането на PI-1 и PI-2, поотделно. Това се вижда и от отчетените ефекти на DSC кривата.



Фиг. 13. Термограма (TG и DTA) на образец PI-6, скорост на нагряване $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Разлагането на състава започва в интервала $180\div 200^{\circ}\text{C}$, като първи екзо пик се отчита при температура 269°C , асоцииран с първично екзотермично разлагане на NaIO_4 до NaIO_3 . Вторият екзо ефект е свързан с първичното разлагане на втория окислител в състава (KIO_4) до калиев йодат, което също е екзотермично. Отделящият се и при двата процеса кислород активно взаимодейства с горивните компоненти в състава и се образуват газообразни продукти от горенето, което се отчита като непрекъсната загуба на маса в TG кривата.

Екзотермичните пикове при 400°C и при 523°C са обусловени от разлагането на NaIO_3 и KIO_3 , съответно до техните йодиди и оксиди, при което отделящият се кислород продължава окислението на неметалните компоненти в състава. При 640°C се наблюдава реакция на окисление със стопяващия се алуминий, отчетена като добре изразен екзотермичен ефект. До около 850°C продължава отделянето на летливи продукти от горенето, което не е свързано с промяна на енергетиката, а се изразява единствено като остатъчна масова загуба от 9%.

2.6. Кислороден баланс на изследваните състави

Кислородният баланс (Oxygen Balance, OB) е изчислен по класическата методология за твърди ракетни горива, включваща единствено неметалните горими

елементи (С, Н и S) и приемане на крайни продукти CO₂, H₂O и SO₂. с нормализация към 100 g състав. Стойностите на ОВ за четирите състава са: PI-1 (-17.4 %), PI-2 (-15.8 %), PI-5 (-23.5 %) и PI-6 (-18.2 %), което ги класифицира като горивно богати (fuel rich). Съставите с ОВ около от -16 до -18 % съответстват на класическите AP-базирани композитни пропеланти, докато съставът с -23.5 % се доближава до долната граница на този клас, с акцент върху стабилност и ниска чувствителност.

2.7. Избор на най-подходящ горивен състав за статични изпитвания

С оглед провеждането на вътрешнобалистични изпитвания и експериментални полетни тестове, е избрана горивната композиция **PI-6**, въз основа на добрата енергийна ефективност и характер на термокинетичното поведение, установени в хода на изследването. Термокинетичният анализ показва плавно, поетапно протичане на процесите на масова загуба и топлоотделяне точно при този горивен състав, за разлика от рязката загуба на маса и отчетливите екзотермични пикове, наблюдавани при другите изпитвани композиции.

2.8. Вътрешнобалистични тестове в моделни ракетни двигатели.

За изследване на вътрешнобалистичните характеристики са използвани малки моделни двигатели с метален корпус и стоманено сопло (Ст 45), включващо графитна вложка в областта на критическото сечение (най-малкият диаметър в отвора на соплото). Симулациите за параметрите на горивния процес са извършени с най-достъпната програма SRM.xls на Richard A. Nakka.

За първия тест, от съображения за сигурност, бе заложено отношение на горящата повърхност на горивото към площта на критическото сечение на соплото с консервативна стойност $K_n = A_b / A_t = 140 \div 180$. След проведения тест се оказа, че това е сравнително нисък K_n , защото измерената скорост на горене бе 5.8 mm/s при отчетено работно налягане 3.4 МРа. При следващите експерименти постепенно е намаляван диаметъра на критическото сечение на соплото до достигане на отношение $K_n = 300$. Измереното работно налягане при тази стойност беше 6.7 МРа, а скоростта на горене е пресметната 8.1 mm/s. Количеството на шлаковете след работата на двигателите значително намаля с повишаване на налягането в горивната камера. Това се дължи на по-пълното изгаряне. предизвикано от по-близкия контакт на реагентите в камерата на двигателя при повишеното налягане. Като резултат се намалява количество кондензирана фаза, респективно отлаганията върху използвания хардуер.

Направени бяха общо 4 наземни тестови изгаряния в ракетен двигател и получените резултати са посочени в Табл. 12.

Таблица 12. Измерени показатели от 4 статични теста на гориво PI-6.

	Маса на горивото, kg	$K_n = A_b / A_t$	Време на горене, s	Измерено налягане P, МПа	Скорост на горене, mm/s
Тест No.					
#1	0.63	140 - 178	2.50	3.40	5.8
#2	0.65	191 - 220	2.10	4.15	6.9
#3	0.64	215 - 281	1.95	5.90	7.6
#4	0.65	234 - 301	1.82	6.70	8.1

За точното определяне стойността на степенния показател „n“ в Закона на Виеле $r = a P^n$, както и други важни параметри на процеса на горене, проведените до момента тестове са определено недостатъчни. Те дават само най-обща информация за поведението на изследвания горивен състав при различните условия на работа.

Необходимо е да бъдат изследвани в детайли реално получаваната полезна тяга, работно налягане, пълнен и специфичен импулс при всеки отделен тест. На следващ етап това може да се постигне с използване на по-прецизно оборудване и достатъчен брой статични тестове, за получаване на по-богата база данни.

2.9. Регистриран аерозолен кондензационен ефект при статичните тестове

При проведената серия от статични изпитвания в моделни ракетни двигатели бе наблюдавано образуването на плътен, бял, нискоразположен аерозолен облак в тестовата зона (Фиг. 14). Това явление се проявяваше устойчиво при всички направени тестове с тези горивни състави и позволи разглеждането му като характерен резултат от взаимодействието между продуктите от горенето и околната атмосфера.



Фиг. 14. Кондензационен облак, формиран след статичен тест на перйодатно гориво.

Съгласно направените вече термохимични модели, почти половината от продуктите на горене на този състав са калиев йодид (KI, 24.77%) и натриев йодид (NaI, 20.91%). След изхвърлянето им от соплото на двигателя (рязко охлаждане при контакт с околния въздух), те преминават в ултрафини аерозоли, съставени от микронни и субмикронни солеви частици. Финодисперсните йодидни аерозоли проявяват силна хигроскопичност и действат като ефективни центрове (ядра) за кондензация на водни пари. Водните пари, съдържащи се в газовите продукти на горенето и в околния въздух, кондензират вторично върху тези ядра и формират плътен солно-индуциран кондензационен аерозол. Физически и концептуално, този механизъм е аналогичен на общия модел, използван при технологиите за облачно засяване (cloud seeding), при които йодиди и други видове соли се използват като изкуствени ядра за кондензация.

Целта на този вид въздействия е инициране на фазови преходи на водната пара в атмосферата. Наблюдаваният от нас процес следва същите принципи на аерозолна нуклеация и вторична кондензация, но в по-малък пространствен мащаб. Той може да се разглежда като част от функционалните характеристики и възможната приложимост на разработените перйодатни състави.

2.10. Полети на експериментални тестови ракети

Основната цел на тези полети е получаването на допълнителни експериментални данни за работата на ракетни двигатели (заредени с перйодатно гориво), с цел валидиране и допълване на резултатите от наземните тестове. За провеждане на полетите бе използвана фамилия експериментални ракети с обозначение „БИО“. разработени от авторския екип. Летящите ракетни модели бяха „БИО-3“ (стартова маса 2.7 kg), „БИО-4“ със стартова маса 3.8 kg, „ЗОДИАК“ (маса 4.6 kg) и ракета „БИО-5“, с маса 6.5 kg (Фиг. 15). При тези полети бяха проследени зависимостите между различните схеми на зареждане на горивото в двигателите им, пълния импулс на тези двигатели и стартовите маси на ракетните модели. Полетите бяха програмирани така,

че да се ограничават до пределна височина (апогей) от 1500 m, съгласно регулаторните изисквания за използване на въздушното пространство в района на площадката за изстрелване.

Данните, записани от бордовите системи на тестовите модели са много близки до заложените параметри в предварителните симулации. Нямаше индикации за критични нестационарни режими в работата на двигателите, респективно в механизма на изгаряне на горивото. Оказа се, че стабилно горене се регистрира, както при заряди с канално горене, така и при неизолирани заряди с горене по всичките им повърхности. При тези тестове се оправда хипотезата за добра повтаряемост и надеждна работа на горивен състав PI-6 при различно зададени режими на изгаряне.



Фиг. 15. Експерименталните ракети, използвани в изследването на горивата.

Събраните при проведените 4 полета резултати показват, че разработването на такъв тип рецептури е реално възможно. С тях могат успешно да се задвижват ракети, а параметрите им са обект на последващи задълбочени изследователски действия с цел постигане на максимална сигурност, безопасност, повтаряемост и възможни подходи за повишаване на енергетиката им.

Продължават изследванията за систематично охарактеризиране и на останалите състави от групата перйодатни горива (PI-1, PI-2 и PI-5). Особен интерес представляват получаваните продукти при изгарянето на състав PI-1, в които (според софтуерните

симулации) се съдържа голямо количество КІ. Пиротехнически състави, отделящи при горенето си такива емисии имат специализирани приложения като биоцидни агенти. Предстои това да бъде потвърдено чрез газов анализ на образци от това гориво.

Проведените експерименти разкриват нови възможности за използване на алкалните перйодати (KIO_4 и $NaIO_4$) в ролята на окислителни за твърди ракетни горива. Чрез включване в горивните композити на епоксидна смола, алуминий и сяра се получават стабилно горящи състави, способни да задвижват експериментални ракетни модели. Получените твърдогоривни композити имат много висока плътност, добра механична здравина, ниска хигроскопичност и лесно се формоват в необходимите форми и размери.

Изводи

1. Създадени са и експериментално изследвани са две основни групи енергетични състави (**карамелни и перйодатни**), базирани на нетоксични и достъпни суровини, които не попадат под специални регулаторни ограничения и позволяват опростени и по-безопасни технологични процеси на получаване. Освен като твърди ракетни горива, чрез подходящо модифициране, те биха могли да се използват и за целите на гражданската пиротехника.

2. За разработеното твърдо гориво от карамелен тип **калиев нитрат/изомалт** е доказано, че има добри физико-механични свойства, ниска чувствителност към външни въздействия, предсказуемо поведение при горене и запазва своите характеристики при съхранение.

3. За първи път са получени **надеждни термохимични, кинетични и балистични характеристики** за карамелното ТРГ КН/изомалт чрез комбинация от моделиране и експериментални измервания. Тези резултати запълват съществуващата научна празнина и предоставят необходимата база за бъдещи оптимизации и разработване на подобрени рецептури.

4. Изследвано е **влиянието на технологични добавки пропиленгликол и железен оксид** върху свойствата на ТРГ калиев нитрат/изомалт. Установено е, че те въздействат върху разпределението на топлинния поток по различни механизми: пропилен гликолът измества енергийния прираст в първата фаза на разпада, докато

железният оксид регулира кинетиката и увеличава интензивността на окислението и структурните трансформации при по-високи температури.

5. Горивото калиев нитрат/изомалт може да намери приложение в пиротехнически и газогенераторни устройства, както и в изделия с ограничени изисквания към създаваната тяга, при които стабилността, повторемостта и намаления екологичен отпечатък са по-важни от получаването на максимално възможни енергетични параметри. То е изключително удачно решение за употреба в ракетни двигатели, необходими за провеждането на:

- научно-изследователски и експериментални разработки в областта на аерокосмическата техника;
- университетски и демонстрационни проекти;
- екологично ориентирани технологични инициативи.

6. Разработени са **иновативни твърди енергетични състави на база алкални перйодати**, които представляват нов клас безхлорни окислители с потенциал за екологично ориентирани приложения. Те притежават висока плътност и добра механична стабилност. При горивните тестове най-добри резултати са регистрирани за състав PI-6, в който участват и двата перйодата като коокислители. При него са отчетени: най-високата скорост на горене, по-малко количество твърди остатъци, много лесна запалимост и бурно газоотделяне.

7. От теоретично разработения модел на горене е установено, че перйодатните горивни системи не отделят токсични хлорсъдържащи газове при горене и са подходящи за специализирани граждански приложения в сферата на целенасочените атмосферни въздействия, и по-конкретно за:

- атмосферното засяване на облачни системи (Cloud Seeding, CS);
- противоградова защита (Hail Suppression, HS);
- разсейване на мъгли (Fog Dissipation, FD);
- кондензация върху облачни ядра (Cloud Condensation Nuclei, CCN);
- йодни биоциди с бърза дезактивация (Iodine-based Biocides, IBB).

8. Проведена е **експериментална верификация** на разработените горивни състави чрез лабораторни анализи, моделни вътрешнобалистични изпитвания и реални

полетни тестове. Резултатите от полетните изпитвания потвърждават реалната приложимост на разработените ТРГ и високия им инженерно приложен потенциал.

9. Разработена и валидирана е **цялостна методология за изследване и оценка на екологични и нетоксични твърди ракетни горива**, която може да бъде използвана както за научни, така и за инженерни и образователни цели.

10. Получените резултати показват, че разработените горива могат да служат както като **екологична алтернатива** на съществуващи горивни системи, така и като **основа за нови функционални приложения** в областта на ракетната техника и пиротехниката.

Приноси

В съответствие с поставените цели в настоящия труд са постигнати резултати с научен, научно-приложен и инженерно-приложен принос, а именно:

1. Формулиран е подробен алгоритъм за изследване и анализ на иновативни екологични и нетоксични твърди ракетни горива, който систематизира и адаптира утвърдените подходи от световната практика.
2. За първи път са определени числени стойности на специфични параметри и константи за твърдо ракетно гориво от карамелен тип калиев нитрат/изомалт.
3. Регистрирано е поведението на гориво калиев нитрат/изомалт при нагряване и са отчетени стойности на топлинните ефекти при неговото термично разлагане.
4. Доказана е изключително слаба чувствителност на горивото калиев нитрат/изомалт към външни механични въздействия.
5. Установена е зависимостта между работното налягане и скоростта на горене чрез проведените вътрешнобалистични изследвания и са получени стойности за реалния специфичен импулс на горивото КН/изомалт.
6. Определени са качествено и количествено продуктите на горене на горивото калиев нитрат/изомалт чрез газов анализ на образци.
7. За първи път са разработени серия съвсем нови по своята рецептура ТРГ, базирани на окислителите калиев метаперйодат и натриев метаперйодат. С помощта на формулирания алгоритъм са изследвани техните физико-механични свойства и са получени конкретни числови стойности.

8. Описани са механизмите на термичното разлагане на създадените периодатни ТРГ. Определени са техните прагове на чувствителност при механични въздействия (удар и триене); изследвана е зависимостта между скоростта на горене и налягането при работа в моделен ракетен двигател.
9. Експериментално е установена възможността за използване на периодатни ТРГ в ролята им на източници за аерозолна нуклеация, с възможности за облачно „засяване“ и биоцидно действие при кризисни ситуации.
10. Верифицирани са получените моделни и аналитични резултати чрез множество полетни изпитания на експериментални ракетни модели.
11. Горивото калиев нитрат/изомалт е успешно тествано в екстремни условия при проведените полетни изпитания на изследователски ракети с рекордни за България и за Европа размери и стартова маса.

ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Скандалиев Х., Крумов К.. Изследване параметрите на екологично ракетно гориво Калиев нитрат-Изомалт | Ninth Scientific Conference with International Participation SPACE. ECOLOGY. SAFETY (SES 2013). 20–22.11.2013. София, България | Proceedings of the Ninth Scientific Conference with International Participation “Space. Ecology. Safety – SES 2013”. стр. 219-224. ISSN 1313-3888
http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202013_DOKLADI/2_Aerospace%20Technologies/13_Skandaliev.pdf
2. Скандалиев Т., Скандалиев Х., Сивева Н. | Екологично чисти безхлорни състави за приложение в ракетната техника и пиротехниката | Ninth Student Scientific Conference “Ecology and Environment”. Konstantin Preslavsky University of Shumen. 23–24.04.2021 | Proceedings of the Ninth Student Scientific Conference “Ecology and Environment”. стр. 97-106. Konstantin Preslavsky University Press Shumen. ISSN 2367-52092021
3. Христофор Скандалиев. Калин Крумов. Томислав Скандалиев. Нели Сивева. ПРОТОТИП НА ПРОТИВОПОЖАРНА РАКЕТА „ДРАКОН“. SES 2021. Seventeenth International Scientific Conference. SPACE. ECOLOGY. SAFETY. 20 – 22 October 2021. Sofia.Bulgaria.145-151.
http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202021_DOKLADI/contentsBG.html
4. Христофор Скандалиев. Калин Крумов. Весислава Тотева. Томислав Скандалиев. София. Биоракети от четвърто поколение „Био-4“. XI International Scientific Conference. „Space. Ecology. Safety“ Sofia. 19 – 21 October 2022
http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202022_DOKLADI/2_Aerospace%20Technologies/12_Skandaliev.pdf
5. Христофор Скандалиев. Весислава Тотева. Доклад ЗЕЛЕНИ РАКЕТНИ ГОРИВА НА БАЗАТА НА ОКИСЛИТЕЛИ ПЕРИОДАТИ. Годишна университетска научна конференция на НВУ „Васил Левски“ гр. Велико Търново. юни 2022. Електронен сборник 2. ISSN 2367-7481 - Сигурност и отбрана. стр. 1479-1489
6. Hristofor Skandaliev. Vesislava Toteva. Exploring alkaline periodate salts as eco-friendly oxidizers for solid rocket propellants. JUCTM. 2026. article accepted for pulication

