

**COLLECTION OF RESEARCH PAPERS**

of the 8th International Research and Practical Conference

**CHEMICAL TECHNOLOGY:  
SCIENCE, ECONOMY AND PRODUCTION**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

VIII Міжнародної науково-практичної конференції

**ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ:  
НАУКА, ЕКОНОМІКА ТА ВИРОБНИЦТВО**



МІНІСТЕРСТВО  
ОСВІТИ І НАУКИ  
УКРАЇНИ



Фармак



ISSN 2786-4898

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Шосткинський інститут Сумського державного університету  
Центральний науково-дослідний інститут  
озброєння та військової техніки збройних сил України  
Публічне акціонерне товариство «Фармак»  
Управління освіти Шосткинської міської ради  
Виконавчий комітет Шосткинської міської ради

## COLLECTION OF RESEARCH PAPERS

of the 8th International Research and Practical Conference

### CHEMICAL TECHNOLOGY: SCIENCE, ECONOMY AND PRODUCTION



## ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

VIII Міжнародної науково-практичної конференції  
**ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ:  
НАУКА, ЕКОНОМІКА ТА ВИРОБНИЦТВО**

(м. Шостка, 27-29 листопада 2024 року)



Суми

Сумський Державний Університет

2024

УДК 66.01

Редакційна колегія:

Головний редактор Закусило Р.В., доцент кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, к.т.н., доцент.

Заступник головного редактора Павленко О.В., завідувач кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, к.т.н.

Відповідальний секретар Скуба Ю.Г. фахівець кафедри економіки та управління Шосткинського інституту Сумського державного університету.

Члени редакційної колегії:

Кравець В.Г. – професор кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, д.т.н., професор;

Худолей Г.М. – завідувач кафедри системотехніки і інформаційних технологій, к.т.н;

Тур О.М. – доцент кафедри економіки та управління, к.е.н.;

Тимофіїв С.В. – ст. викладач кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, к.х.н.;

Пригара І.О. – ст. викладач кафедри економіки та управління, к.е.н.

Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», м. Шостка, 27 - 29 листопада 2024 року. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 242 с.

ISSN 2786-4898.

Збірник містить наукові праці учасників VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», що складаються з узагальнених матеріалів науково-дослідних робіт науковців різних галузей виробництв та наукових закладів України.

У збірнику висвітлюються актуальні питання спеціальної хімічної технології і виробництва боєприпасів, утилізації відходів виробництв різних галузей, енергозбереження, моделювання технологічних процесів, соціально-економічні аспекти виробництва та природокористування в умовах війни.

Збірник корисний робітникам хімічної промисловості, науковим співробітникам, аспірантам і студентам спеціальностей хіміко-технологічного та соціально-економічного профілів, фахівцям інформаційних технологій виробництва.

Наукові праці учасників конференції подаються в авторській редакції.

© Шосткинський інститут  
Сумського державного університету, 2024  
© Сумський державний університет, 2024

## **ОЛЕОХІМІЧНІ ПРОДУКТИ ЯК ПЕРСПЕКТИВНІ КОМПОНЕНТИ СУМІШЕВИХ РАКЕТНИХ ТВЕРДИХ ПАЛИВ**

**К.Є. Варлан, О.В. Черваков, К.М. Сухий, О.А. Беляновська**

Український державний університет науки і технологій

[konstvarlan@meta.ua](mailto:konstvarlan@meta.ua)

В даний час та у найближчій перспективі головним державним пріоритетом є відбиття зовнішньої агресії, збереження суверенітету та територіальної цілісності України. Досвід бойового протистояння вказує на те, що найбільш ефективною і перспективною оборонною та наступальною зброєю є засоби дальнього ураження, до яких належить ракетна техніка. Значну кількість видів ракетної техніки як військового так і цивільного призначення оснащують двигунами на сумішевому ракетному твердому паливі (СРТП). Паливні заряди СРТП формують шляхом тверднення сумішей окиснювача, переважно перхлорату амонію (ПХА), полімерного пального-зв'язувального та певних функціональних добавок. [1, 2]. Невід'ємними функціональними добавками СРТП є поверхнево-активні речовини (ПАР), пластифікатори, регулятори швидкості горіння тощо, які забезпечують потрібний рівень технологічних та тактико-технічних характеристик. У якості пластифікаторів СРТП традиційно використовують дибутилфталат (ДБФ), діоктилфталат (ДОФ), діоктилсебацінат (ДОС), діоктиладипінат (ДОА), в окремих випадках - нітроалкани, азиди тощо. У якості ПАР використовують, зокрема, сульфосукцинати, олігоалкиленоксиди, аміновмісні похідні жирних кислот тощо [3]. Вищезначені синтетичні сполуки органічного походження складають основу сучасної компонентної бази виробництва СРТП, а сировиною для їх синтезу є переважно викопні вуглеводні [4].

В умовах зовнішньої військової агресії Україна конче потребує сучасного високотехнологічного ракетного озброєння. Досвід взаємодії з міжнародними партнерами-постачальниками озброєнь свідчить, що для збереження суверенітету, незалежності і цілісності країни варто розраховувати, перед усім, на власні спроможності. Вітчизняна промисловість має виробничі потужності та досвід створення сучасних зразків ракетної техніки і ракетних палив. Але її можливості обмежені, зокрема, відсутністю або недостатністю компонентів для СРТП, потреба в яких задовольняється переважно імпортними надходженнями. Значна кількість таких імпортних товарів належить до матеріалів подвійного призначення, що обмежує їх доступність. Виробництво аналогів такої продукції потребує відповідної власної сировинної бази, яка в Україні також є вкрай недостатньою, а сучасні технології її виробництва не завжди відповідають регуляторним вимогам щодо збереження довкілля [5]. До того ж багаторічна практика застосування та результати досліджень СРТП свідчать, що використовувані компоненти, зокрема пластифікатори, регулятори швидкості горіння, не мають бажаної спорідненості з палимим-зв'язувальним і схильні до міграції, що впливає на комплекс властивостей зарядів СРТП і конструктивних елементів твердопаливних двигунів [6].

Найбільш доцільним шляхом комплексного вирішення означених проблем виглядає розширення вітчизняної компонентної бази для виготовлення СРТП через розробку та впровадження технологій виробництва компонентів СРТП на основі доступної та відновлюваної вітчизняної сировини. Серед найбільш доступних і затребуваних на сьогодні видів відновлюваної сировини є рослинні олії (РО), одним із світових лідерів-виробників якої є Україна. РО використовують для виготовлення

великого асортименту практично значущих продуктів. Актуальність РО як хімічної сировини і як об'єкта ґрунтовних досліджень, зокрема [7-9], невпинно зростає. Доступність та широкі можливості щодо хімічних перетворень РО обумовили формування в межах органічного і полімерного синтезу самостійного напрямку – олеохімії.

З огляду на вищенаведене, авторами розроблено методики синтезу олеохімічних продуктів (ОП) [9] як перспективних складових вітчизняної компонентної бази для СРТП, та запропоновано розрахункову методику прогнозування енергетичних характеристик твердопаливних композицій на основі цих продуктів. Відомо [10, 11], що розрахункові методи використовують для прогнозування енергетичних характеристик ракетних палив, особливо на ранніх стадіях їх проектування.

ОП – передбачувані компоненти СРТП синтезовано шляхом амінування метилових естерів вищих жирних кислот доступними амінами: діетаноламіном (продукт А-1), діетилентріаміном (продукт А-2), піперазином (продукт А-3), морфоліном (продукт А-4) тощо. Синтезовані ОП – в'язкі плинні за звичайної температури прозорі рідини від жовтого до червоно-коричневого кольору (продукти А-1, А-3, А-4), або пастоподібні маси світло-жовтого кольору. Параметри розчинності синтезованих ОП, які розраховано відповідно до [12, 13], мають значення від  $18 \text{ МДж}^{0,5} \cdot \text{м}^{-1,5}$  – для продукту А-3, до  $25 \text{ МДж}^{0,5} \cdot \text{м}^{-1,5}$  – для продукту А-2, що відповідає інтервалу значень для органічних сполук – компонентів паливних зв'язувальних штатних СРТП: рідких каучуків, епоксидних олігомерів, ізоціанатів та олігодіолів. Тому слід очікувати гарної термодинамічної спорідненості ОП з наведеними компонентами сумішевих паливних композицій.

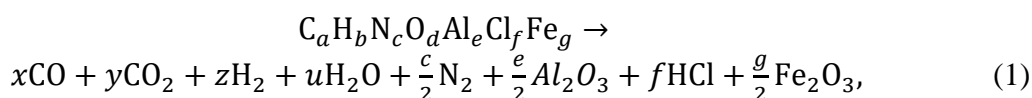
Для визначення перспективності ОП як компонентів СРТП виконано розрахунки значень енергетичних характеристик умовних сумішей і порівняно з відповідними значеннями базової рецептури. За базову вибрано усереднену рецептуру СРТП за даними [1, 3, 14], % мас.: ПХА – 65,0; АІ – 18,5; каучук НТРВ – 9,0; ДОА – 6,4; ізофорондіізоціанат – 0,5; ДАФ-2 – 0,6. Умовні рецептури отримували заміною певних функціональних компонентів в базовій на відповідні ОП. Розраховували такі енергетичні характеристики:

– теплоту згоряння палива  $Q_v$  – кількість теплоти, утвореної під час згоряння 1 кг СРТП без доступу окиснювача ззовні та за умови охолодження продуктів горіння до стандартної температури;

– температуру продуктів горіння палива  $T_1$  – температуру, яку мають кінцеві продукти горіння безпосередньо в момент їх утворення;

– питомий об'єм продуктів згоряння (ПЗ) палива  $W_1$  – об'єм газоподібних та пароподібних продуктів, утворюваних в результаті згоряння 1 кг МРСФ в інертному середовищі, наближеному до нормальних термодинамічних умов, і за умови перебування води в продуктах горіння у пароподібному стані.

За основу алгоритму розрахунків взято методику [15], запропоновану для балістичних палив, яку модифіковано з огляду на присутність в паливі металів і хлору. В цьому випадку процес згоряння 1 кг СРТП можна навести наступним узагальненим рівнянням хімічної реакції:



де  $a, b, c, d, e, f, g$  – кількість грам-атомів відповідного хімічного елементу в 1 кг MRSF.

Співвідношення перших чотирьох сполук у продуктах горіння, утворюваних за вищенаведеною реакцією, пов'язане з константою рівноваги реакції водяного газу:

$$K_{в.г} = \frac{\vartheta_{CO} \cdot \vartheta_{H_2O}}{\vartheta_{CO_2} \cdot \vartheta_{H_2}}, \quad (2)$$

де  $K_{в.г}$  – константа рівноваги реакції водяного газу;

$\vartheta$  – кількість моль відповідної сполуки, позначеної індексом, в продуктах згоряння 1 кг СРТП.

Методика розрахунків енергетичних характеристик композицій передбачає:

- складання рівняння перетворення 1 кг СРТП (1) з визначенням коефіцієнтів (кількості моль) перших чотирьох ПЗ через значення  $K_{в.г}$  (2) для  $T_1$ , близької до реальної температури горіння СРТП:

$$u = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot \Gamma}}{2 \cdot A},$$

де  $A = K_{в.г} - 1$ ;

$$B = K_{в.г} \cdot (0,5 \cdot b' + d' - a) + 2 \cdot a - d';$$

$$\Gamma = K_{в.г} \cdot 0,5 \cdot b' \cdot (d' - a);$$

$$b' = b - f$$

$$d' = d - 3 \cdot (g + e) / 2$$

$$y = d' - (a + u)$$

$$x = a - y;$$

$$z = 0,5 \cdot b' - u;$$

$$K_{в.г} = \frac{x \cdot u}{y \cdot z}.$$

- розрахунок  $Q_V$  відповідно до складеного рівняння перетворення за рівнянням:

$$Q_V = -\Delta_f H_{(ПЗ)}^0 - (-\Delta_f H_{(СРТП)}^0) - j_n R T, \quad (3)$$

де  $\Delta_f H_{(ПЗ)}^0$  – сума стандартних ентальпій утворення ПЗ 1 кг СРТП, кДж/кг;

$\Delta_f H_{(СРТП)}^0$  – сума стандартних ентальпій утворення компонентів 1 кг СРТП, кДж/кг;

$j_n$  – кількість моль газоподібних простих речовин, з яких утворені 1 кг СРТП та ПЗ;

$R$  – універсальна газова стала, кДж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;

$T$  – стандартна температура, К;

– перевірка правильності вибору передбачуваної  $T_1$  за рівнянням (4):

$$T_1 = \frac{Q_V}{\sum \vartheta_m \bar{c}_{v\mu_m}} + T_0,$$

де  $\vartheta_m$  – кількість моль  $m$ -ї сполуки в РЗ 1 кг композиції (тобто  $x, y, z, u, c/2, e/2, f, g/2$ );

$\bar{c}_{v\mu_m}$  – середня ізохорна мольна теплоємність  $m$ -ї сполуки в РЗ в інтервалі температур  $T_1 - T_0$ , де  $T_0$  – стандартна температура (298 К).

Якщо розрахункова  $T_1$  відрізняється від передбачуваної не більше ніж на  $50^\circ$ , її значення приймають за остаточне, в іншому випадку вищенаведені розрахунки повторюють для  $K_{w.g}$ , що відповідає розрахунковій температурі;

- визначення питомого об'єму продуктів згоряння палива  $W_1$ ,  $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ , за формулою

$$W_1 = 0,02241 \cdot \sum l_j,$$

де  $l_j$  – кількість моль  $j$ -ї газо- та пароподібної сполуки в РС 1 кг композиції.

Згідно з виконаними розрахунками, заміна в базовій рецептурі пластифікатора ДОО на продукти А-1, А3 і А-4 несуттєво впливає на енергетичні властивості СРТП:

СРТП	$Q_V$ , кДж·кг <sup>-1</sup>	$T_1$ , К	$W_1$ , м <sup>3</sup> ·кг <sup>-1</sup>
Базова рецептура	5860	3450	0,818
Рецептура із заміною ДОО на А-1	5725	3376	0,821
Рецептура із заміною ДОО на А-3	5615	3314	0,832
Рецептура із заміною ДОО на А-4	5605	3313	0,826

З вищенаведених даних випливає, що заміна в базовій рецептурі пластифікатора ДОО на ОП несуттєво знижує  $Q_V$  – на (2,3-4,4)% і  $T_1$  – на (2,1-4,0)%, але збільшує  $W_1$  на (0,4-1,7)%.

Розрахунки показали, що заміною в базовій рецептурі рідко-в'язкої складової на комбінації синтезованих ОП з іншими доступними пальними-зв'язувальними – поліізоціанатом (ПІЦ), епоксидними смолами типу ЕД-20, поліетиленполіаміном типу НЕРА, рициновою олією (РО), олеїновою кислотою (ОК) можна, за того ж вмісту ПХА і АІ, отримати СРТП з не гіршими, ніж у базовій рецептурі, енергетичними показниками:

Якісний склад пального-зв'язувального	$Q_V$ , кДж·кг <sup>-1</sup>	$T_1$ , К	$W_1$ , м <sup>3</sup> ·кг <sup>-1</sup>
ПІЦ; РО; А-1; А-3; аддукт солі Fe з А-2	5895	3411	0,829
ЕД-20; НЕПА, ОК, сіль Fe	5811	3469	0,786
ЕД-20; НЕПА, А-1; ОК; аддукт солі Fe з А-2	5831	3475	0,789

Отримані результати вказують на перспективи щодо розширення компонентної бази для сумішевих ракетних твердих палив за рахунок олеохімічних продуктів на основі вітчизняної сировини.

#### Список літературних джерел

1. Lysien, K.; Stolarczyk, A.; Jarosz, T. Solid Propellant Formulations: A Review of Recent Progress and Utilized Components / Materials. – 2021. – Vol. 14, No 21. – 6657. <https://doi.org/10.3390/ma14216657>

2. Mustafa Guven Gok; Omer Cihan. Energetic Materials and Metal Borides for Solid Propellant Rocket Engines / The International Journal of Materials and Engineering Technology. – 2020. – Vol. 003. – P. 109-119. URL <https://www.researchgate.net/publication/348035213>

3. Reid, D.; Fisher, M.; Dillier, C. A. M.; Demko, A. R.; Petersen E. L. (2023). Tri-Regime Composite Solid Propellant. US Patent No. 2023035372 (A1).

4. Shalini Chaturvedi; Pragnesh N. Dave. Solid propellants: AP/HTPB composite propellants / *Arabian Journal of Chemistry*. – 2019. – Vol. 12. – P. 2061-2068. URL <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
5. European Parliament and Council Directive 94/63/EC of 20 December 1994 on the control of volatile organic compound (VOC) emissions resulting from the storage of petrol and its distribution from terminals to service stations. URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A31994L0063>
6. Juliano Libardi; Sérgio P. Ravagnani; Ana Marlene F. Morais, Antonio Roque Cardoso. Study of plasticizer diffusion in a solid rocket motor's bond line. / *Journal of Aerospace Technology and Management*. – 2009. – Vol. 1, No 2. – P. 223-229. URL <https://doi.org/10.5028/jatm.2009.0102223229>
7. Qiang Yan; Brian F. Pflieger. Revisiting metabolic engineering strategies for microbial synthesis of oleochemicals / *Metabolic Engineering*. – 2020. – V. 58. – P. 35-48. URL <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2019.04.009>
8. Qinghe Fu; Yilang Long; Yingyun Gao; Yuan Ling; Hao Qian; Fang Wang; Xinbao Zhu. Synthesis and properties of castor oil-based plasticizers / *RSC Advances*. – 2019. – Vol. 9. – P.10049-10057. URL <https://doi.org/10.1039/c8ra10288k>
9. Varlan, K. Ye.; Kuzminskyi, V. Yu.; Chervakov, O. V.; Sverdlikovska, O. S. Amide and amidoester fatty acid derivatives as multifunctional components of protective alkyd urethane coatings / *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. – 2024. – No. 4. – P. 10-16. URL <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-155-4-10-16>
10. Thomas, James C.; Petersen, Eric L. HTPB Heat of Formation: Literature Survey, Group Additive Estimations, and Theoretical Performance Effects / *AIAA Scitech 2021 Forum*. 2021. <https://doi.org/10.2514/6.2021-1971>
11. Kositsyna, O.; Varlan, K.; Dron, M.; Kulyk, O. Determining energetic characteristics and selecting environmentally friendly components for solid rocket propellants at the early stages of design / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – Vol.6, No 6 (114). – P. 6-14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247233>
12. Askadskii, A. A. *Computational Materials Science of Polymers*. Cambridge International Science Publishing, 2003. – 696 p. URL <https://books.google.co.vi/books?id=-8WBsBl0aUwC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false> (15.09.2024)
13. Варлан К. Є., Шевцова К. Р. Співполімери малеїнового ангідриду і стиролу та іонообмінні плівочні матеріали на їх основі / *Journal of Chemistry and Technologies*. – 2022 – Vol. 30, No 4. – P. 466-474. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i4.268119>
14. Liang, J.; Nie, J.; Zhang, H.; Guo, X.; Yan, S.; Han, M. Interaction Mechanism of Composite Propellant Components under Heating Conditions. *Polymers*. – 2023, No 15, 2485. <https://doi.org/10.3390/polym15112485>
15. Варлан, К. Є. Розрахунки енергетичних характеристик спецматеріалів. Д. : Ліпа, 2022. – 38 с.