

*Віталій Нуязін*, канд. тех. наук, доцент, (ORCID: 0000-0003-4785-0814)

*Артем Майборода*, канд. пед. наук, доцент, (ORCID: 0000-0001-6108-9772)

*Ольга Мельник*, канд. тех. наук, професор, (ORCID: 0000-0002-9671-108X)

*Олена Даник* (ORCID: 0009-0003-6849-3403)

*Сергій Ведула* (ORCID: 0000-0001-6191-8737)

*Дмитро Лесечко*, канд. тех. наук, (ORCID: 0000-0000-0000-0000)

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України

## ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ УТВОРЕННЯ АЛКІЛГЛІЦИДНИХ ЕТЕРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ЇХ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

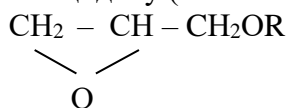
Епоксидні сполуки, тобто сполуки, які містять тричленне кільце з двох атомів гідрогену і одного атому кисню, були синтезовані в середині минулого сторіччя і спочатку використовувалися лише в якості вихідних продуктів для епоксидних смол [1]. Але з часом область їх застосування значно розширилася. Зокрема, увагу хімічної промисловості привернули гліцидол і його похідні, в яких гідроксильний атом гідрогену заміщений на алкільні групи. Історія виготовлення і застосування етерів гліцидолу (епоксидних етерів) нараховує лише декілька десятків років. Але сьогодні вони широко використовуються в промисловості, зокрема в якості розчинників, напівпродуктів для синтезу інших хімічних продуктів і, в особливо великих кількостях, як активні розріджувачі і модифікатори епоксидних смол та інших полімерних матеріалів [2-4]. Теоретичні і лабораторні дослідження властивостей цих сполук за розвитком масштабів їх виготовлення і застосування не встигають. Між тим, більшість з них відносяться до речовин горючих, а нижчі представники (метилгліцидол та етиловий, пропіловий і н-бутиловий похідні) можливо і до легкозаймистих. Це викликає необхідність детального вивчення їх термодинамічних властивостей, в основі більшості з яких - теплота утворення сполуки. В даній роботі проведено визначення цього показника для чотирьох найбільш типових представників цих сполук через експериментальне визначення теплоти їх згорання і наступний перерахунок за законом Геса.

**Ключові слова:** Теплота утворення, теплота згорання, етери гліцидолу.

**Вступ.** Алкілгліцидні етери є важливими хімічними сполуками, що знаходять широке застосування в різних галузях промисловості, зокрема в лакофарбових матеріалах, полімерній хімії та виробництві клеїв. Їх хімічна структура та реакційна здатність визначають специфічні властивості, які роблять ці сполуки ефективними в технологічних процесах. Проте, як і багато органічних речовин, алкілгліцидні етери потенційно небезпечні з точки зору пожежної безпеки, оскільки їхні фізико-хімічні характеристики можуть сприяти швидкому розповсюдженню полум'я та значному виділенню тепла під час горіння.

Одним з ключових параметрів, що впливає на пожежну небезпеку хімічних речовин, є їхня теплота утворення — кількість енергії, що виділяється або поглинається при утворенні сполуки з елементів у стандартних умовах. Визначення теплоти утворення алкілгліцидних етерів є важливим кроком для визначення їх пожежної небезпеки, оскільки цей параметр дозволяє прогнозувати поведінку речовини при займанні та оцінити енергію, що виділяється під час її горіння. Дослідження теплоти утворення також сприяє розробці заходів для зменшення ризиків, пов'язаних з експлуатацією цих речовин, та вибору більш безпечних аналогів для використання в промислових процесах.

**Постановка проблеми.** Етери гліцидолу (епоксидні етери) загальної формули



і їх похідні з відкритим циклом широко застосовуються в промисловості. Епоксидна група цих сполук здатна легко розкриватися, забезпечуючи приєднання молекули до речовин, які мають активний атом гідрогену, таких як спирти та аміни. В-основному, бутилгліцидол і його гомологи використовуються в якості активних розріджувачів епоксидних смол. Але в останні роки подібні сполуки, особливо ті, що додатково містять пероксидну групу, запропоновано застосовувати для модифікації інших полімерних матеріалів [3,4] і для просочення текстильного корду при виготовленні автомобільних шин, особливо шин великовантажних автомобілів, де вони значно покращують такий показник як «міцність на роздер» [2]. В останньому випадку епоксидна група забезпечує зв'язок силами основних хімічних валентностей з гідроксилами корду, а пероксидна складова – такий же зв'язок з каучуковим компонентом шини. Такі зв'язки значно міцніші, ніж сили адсорбції, які утворюються між кордом і гумою при застосуванні різного роду просочувачів корду. Аналогічну дію чинять етери гліцидолу і при застосуванні в якості пластифікаторів великої кількості полімеризаційних і поліконденсаційних пластмасових виробів. Тут вони вбудовуються безпосередньо в основний ланцюг знов-таки валентними зв'язками, і, на відміну від звичайних пластифікаторів, з часом не «випотівають», забезпечуючи виробам довговічність і постійний пристойний зовнішній вигляд. Тим часом, маючи в своїй структурі значний відсоток гідрогену і карбону, етери гліцидолу здатні горіти з виділенням великої кількості теплоти. При цьому, нижчі представники можливо відносяться і до легкозаймистих рідин (дані про температуру їх спалаху не знайдені і становитимуть предмет наступного дослідження). Відсутність в літературі термодинамічних даних для таких сполук не дозволяє проводити термодинамічний аналіз реакцій з їх участю. Основою розрахунків більшості термодинамічних властивостей горючих речовин є теплота їх утворення. А ці дані для гліцидилових етерів в літературі відсутні. Розрахунок же теплоти утворення і теплоти згорання сполук з епоксидним циклом ускладнений наявністю саме епоксидного циклу з помітною енергією напруженості, і надійних даних не дає. Абсолютно точні дані дає лише ретельно виконаний експеримент. Результати роботи дозволять глибше зрозуміти взаємозв'язок між хімічною структурою алкілгліцидні етери та їхніми пожежонебезпечними характеристиками, що стане основою для розробки рекомендацій щодо підвищення безпеки на виробництвах, де використовуються ці сполуки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З розрахункових методів найбільш теоретично обґрунтованим методом визначення теплоти згорання є розрахунок за наслідком із закону Геса [5], який дає значення теплоти згорання речовини як різницю між теплотами утворення продуктів реакції згорання і теплотою утворення вихідної речовини. Однак, остання визначається розрахунком саме з експериментально визначеної теплоти згорання. Отже, для нових речовин, теплота згорання яких невідома, метод непридатний. Тому при розрахунку теплоти згорання (і теплоти утворення) нових речовин доводиться використовувати наближені формули, які мають різний ступінь точності.

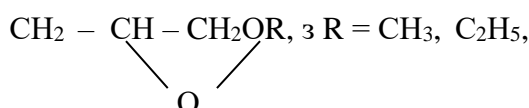
Найпростішим є розрахунок за формулою, яка базується на відсотковому складі хімічної речовини і експериментальному значенні теплоти згорання кожного горючого елемента в ній, та теплоти, яка поглинається присутнім в молекулі негорючим елементом, зокрема киснем [5]. Формулу було виведено із статистичних даних, отриманих при спалюванні простих вуглеводнів лінійної структури і їх оксиген-, сульфур- та нітроген-похідних. Зрозуміло, що в даному випадку не враховується вплив на енергію згорання взаємодії між собою хімічних елементів і їх угруповань, тобто не враховуються ані індукційні впливи, ані впливи хімічного поля, ані все інше. Формула враховує тільки тепловий ефект окиснення схильних до цього атомів, зокрема атомів карбону, гідрогену і сульфуру. А чим складніша молекула, тим більшу взаємну енергетичну дію проявляють

атоми і групи атомів, як внутрішньомолекулярну так і міжмолекулярну. Тобто, чим складніша речовина, тим менша достовірність отриманих даним розрахунком значень.

Дещо більш точним представляється метод Хандрика [6]. Тут застосовується стандартна формула  $-\Delta H_c^\circ = \sum a_1 + 2\beta \sum b_1$ . Структурні константи  $a_1$  і  $b_1$  для насичених нерозгалужених вуглеводнів приймаються сталими і наводяться у відповідних таблицях. Коефіцієнт  $\beta$  визначається з хімічного рівняння горіння речовини, як стехіометричний коефіцієнт перед молекулою кисню, потрібного для повного спалювання одної молекули горючої речовини. Це, до речі, вносить додаткові похибки, адже цей коефіцієнт для всіх ізомерних сполук однаковий, а теплота згорання залежить і від будови молекули. Особливо це стосується молекул, які містять в структурі гетерогенні циклі, зокрема тричленний цикл з двох атомів гідрогену і одного атому кисню. Для врахування впливу на теплоту згорання розміру молекули, особливостей її будови і окремих замісників вводяться поправки, визначені із статистичних даних експериментального спалювання подібних речовин. Однак, емпіричні поправки всі можливі структурні видозміни врахувати не в змозі. Зокрема, в тричленному епоксидному циклі поправки Хандрика визначено для молекул певної симетричності, і застосування їх для молекул несиметричних, таких як алкілгліцидилові етери, може призвести до значних похибок.

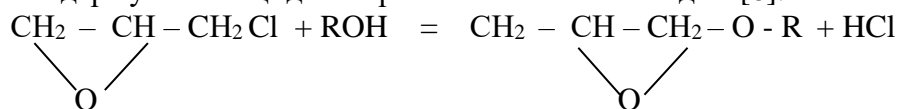
До деякої міри взаємний вплив атомів в молекулі (так би мовити, ближній вплив) враховується при визначенні теплоти згорання за різницею суми енергій зв'язків між атомами в продуктах реакції і суми енергій зв'язків у вихідних речовинах [7]. Але і тут враховуються тільки енергії зв'язків між атомами, безпосередньо пов'язаними між собою. Взаємний же внутрішньомолекулярний і міжмолекулярний вплив груп атомів залишається поза увагою. Отже, надійне значення термодинамічних даних для таких сполук як етери гліцидолу можна отримати лише експериментальним шляхом.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті було експериментальне визначення теплоти спалювання чотирьох найбільш типових представників алкілгліцидних етерів: метилпропіонат, етилпентаноат, етилгептаноат, метилгептаноат.



$\text{C}_4\text{H}_9$  і  $\text{C}(\text{CH}_3)_3$  та перерахунок їх у теплоту утворення за наслідком із закону Геса.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Синтез таких сполук проводився з епіхлоргідрину та відповідного спирту у присутності гідроксиду калію по методиці, яка дозволяє одержувати гліцидні етери з найбільшим виходом [8].



Для очистки застосовувалися препаративна хроматографія на оксиді алюмінію другого ступеня активності з елююванням гексаном і наступна вакуумна ректифікація при залишковому тиску ( $P_{\text{зал.}}$ ) до 10 мм рт. ст. Критерій чистоти - результати елементного аналізу з точністю  $\pm 0,02 - 0,03$  % по гідрогену і  $\pm 0,06 - 0,10$  % по карбону. Вміст епоксидного кисню визначався методом зворотного титрування за кількістю приєднаного гідроген хлориду [9]. Метод дозволяє визначення з точністю  $\pm 0,20 - 0,25$  %. Результати елементного аналізу наведені в таблиці 1, результати визначення епоксидного кисню - в таблиці 2, а фізичні характеристики синтезованих етерів гліцидолу - в таблиці 3.

Теплота згорання визначалась в калориметрі з ізотермічною оболонкою (рис. 1).

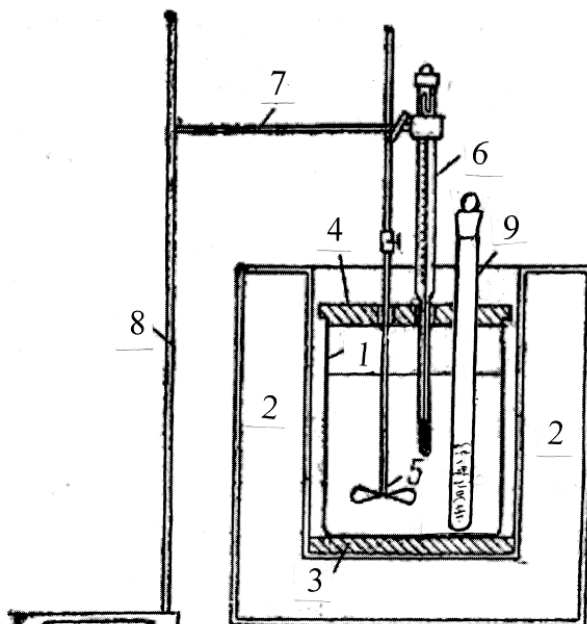


Рисунок 1 – Калориметр з ізотермічною оболонкою. 1 – калориметричний стакан; 2 – ізотермічна оболонка; 3- підставка; 4 - кришка; 5 - мішалка; 6 – термометр Бекмана; 7 – лапка штативу; 8 – штатив; 9 – пробірка з наважкою солі.

Спалювання проводилось в тонкостінних скляних ампулах, які герметизувалися скляною пробкою і спеціальною замазкою. Визначена попередньо теплота згоряння замазки дорівнювала  $38,62 \pm 0,05$  Дж/мг. Ампула розміщала у платиновій чашці та накривалася платиновою кришкою. В бомбу, в яку встановлювалася чашка, попередньо вводився 1 мл дистильованої води. Бомба продувалася і заповнювалася киснем, який очищався від горючих домішок, води та вуглекислого газу до тиску в 2-3 МПа. Підпалювання проводилося таблетками бензойної кислоти з впресованою в них бавовняною ниткою. Тривалість головного періоду дослідів 20 хв., початкова температура  $25,00 \pm 0,01$  °С. Кількість спаленого в досліді етеру розраховувалась по масі  $\text{CO}_2$ , який утворився [10]. Згорання було повним:  $\text{CO}$  в продуктах згоряння знайдено не було. В кожному досліді враховувалися поправки на згоряння бензойної кислоти, нитки та замазки. Результати експериментальних досліджень представлені в таблиці 4.

Таблиця 1 - Результати елементного аналізу синтезованих алкілгліцидних етерів

№ з/п	Хімічна формула	Знайдено		Розраховано	
		[C]	[H]	[C]	[H]
1	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O - CH}_3 \\ \backslash \ / \\ \text{O} \end{array}$	54,49	9,12	54,55	9,09
2	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O - C}_2\text{H}_5 \\ \backslash \ / \\ \text{O} \end{array}$	58,78	9,82	58,82	9,80
3	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O - C}_4\text{H}_9 \\ \backslash \ / \\ \text{O} \end{array}$	64,59	10,80	64,62	10,77
4	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O - C(CH}_3)_3 \\ \backslash \ / \\ \text{O} \end{array}$	64,58	10,79	64,62	10,77

Таблиця 2 - Результати визначення епоксидного оксигену

№ з/п	Хімічна формула	М	[O] <sub>епі</sub>	
			Знайдено	Розраховано
1	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-CH}_3 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	88	18,1	18,2
2	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-C}_2\text{H}_5 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	102	15,4	15,7
3	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-C}_4\text{H}_9 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	130	12,3	12,3
4	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-C(CH}_3)_3 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	130	12,2	12,3

Таблиця 3 - Фізичні характеристики синтезованих алкілгліцидних етерів

№ з/п	Хімічна формула	T <sub>кип</sub> <sup>0</sup> С, (P <sub>зал.</sub> , мм рт. ст.)	n <sub>d</sub> <sup>20</sup>	d <sub>4</sub> <sup>20</sup> , г/см <sup>3</sup>
1	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-CH}_3 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	110-112 (760)	1,4044	0,9810
2	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-C}_2\text{H}_5 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	80-82 (90)	1,4083	0,9627
3	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-C}_4\text{H}_9 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	57-58 (10)	1,4175	0,9148
4	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-C(CH}_3)_3 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	58-59 (10)	1,4162	0,9193

Таблиця 4 - Теплота згоряння алкілгліцидних етерів, визначена експериментально

№ з/п	Хімічна формула	H <sub>зр</sub> , кДж/кг	H <sub>зр</sub> , кДж/моль
1	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-CH}_3 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	-26767,6	-2355,6
2	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-C}_2\text{H}_5 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	-29744,0	-3033,9
3	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-C}_4\text{H}_9 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	-33786,2	-4392,2
4	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{-O-C(CH}_3)_3 \\ \diagdown \quad / \\ \text{O} \end{array}$	-33684,5	-4379,0

Як видно з таблиці 4 збільшення теплоти згоряння спостерігалось при підніманні етерів по їх гомологічному ряду.

Як відомо, межею горючості речовин за теплою горіння вважається величина у 2100 кДж/кг [5]. Проведені експериментальні випробування показали, що 1 кг навіть метилгліцидолу, який має у своїй структурі відносно великий відсоток кисню, згорає з виділенням більше 26000 кДж тепла, тобто безумовно складає певну пожежну небезпеку. Решта цих етерів має в структурі менший відсоток кисню і більший відсоток карбону та гідрогену. Відповідно, у пожежному відношенні вони ще більш небезпечні. Хоча не все так однозначно. Нижчі представники мають меншу теплоту горіння, але і нижчу температуру кипіння, тобто є більш летючими і а ргіорі мають меншу температуру спалаху. Можливо навіть відносяться до легкоспалахуючих рідин. У будь якому випадку при виготовленні і застосуванні цих речовин повинна бути детальна обізнаність з їх термодинамічними властивостями, для розрахунку яких в першу чергу потрібно знати такий показник як теплота утворення.

Наступним етапом роботи було визначення теплот утворення досліджуваних етерів на основі отриманих даних про їх теплоти згорання. Визначення проводилось розрахунковим шляхом.

**Розрахункова частина.** За законом Геса [5]:  $\Delta H_{\Gamma} = \Sigma H_{\text{п.г.}} - \Sigma H_{\text{р.г.}}$ , де

$\Delta H_{\Gamma}$  – теплота реакції горіння (або, якщо поміняти знак на протилежний, тепловий ефект реакції);

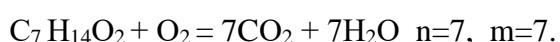
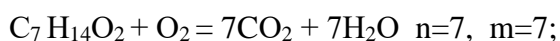
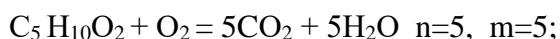
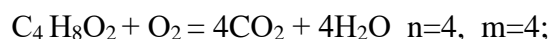
$\Sigma H_{\text{пг}}$  – сума теплот утворення продуктів реакції;

$\Sigma H_{\text{рг}}$  – сума теплот утворення вихідних горючих речовин.

В даному випадку при горінні одної молекули горючої речовини утворюється  $n$  молекул вуглекислого газу та  $m$  молекул парів води. Отже, після адаптації та перетворення формули маємо:

$$(\Delta H_{\text{утвор.}})_{\text{етеру}} = n(\Delta H_{\text{утвор.}})_{\text{CO}_2} + m(\Delta H_{\text{утвор.}})_{\text{H}_2\text{O}} - (\Delta H_{\Gamma})_{\text{етеру}}$$

Стехіометричні коефіцієнти  $n$  та  $m$  знаходяться з рівнянь горіння в кисні кожного з етерів:



$$(\Delta H_{\text{утвор.}})_{\text{CO}_2} = -393,5 \text{ кДж/моль}; \quad (\Delta H_{\text{утвор.}})_{\text{H}_2\text{O}} = -241,8 \text{ кДж/моль}.$$

Результати розрахунку теплоти утворення досліджених етерів гліцидолу наведено в табл.5.

Таблиця 5 - Розрахунок теплоти утворення етерів гліцидолу

№ з/п	Речовина	$\Delta H_{\Gamma}$ , кДж/моль	$n \times (-393,5)$	$m \times (-241,8)$	$\Delta H_{\text{утвор.}}$ , кДж/моль
1	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{ - 0 - CH}_3 \\ \quad \quad \quad \backslash \quad / \\ \quad \quad \quad \text{O} \end{array}$	-2355,6	-1574,0	-967,2	-183,7
2	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{ - 0 - C}_2\text{H}_5 \\ \quad \quad \quad \backslash \quad / \\ \quad \quad \quad \text{O} \end{array}$	-3033,9	-1967,5	-1209,0	-142,6
3	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH - CH}_2\text{ - 0 - C}_4\text{H}_9 \\ \quad \quad \quad \backslash \quad / \\ \quad \quad \quad \text{O} \end{array}$	-4392,2	-2754,5	-1692,6	-68,1

4	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH} - \text{CH}_2 - \text{O} - \text{C}(\text{CH}_3)_3 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{O} \end{array}$	-4379,0	-2754,5	-1692,6	-81,3
---	--	---------	---------	---------	-------

Як видно з таблиці, на відміну від теплот згорання, теплоти утворення збільшуються при опусканні етерів по гомологічному ряду. Збільшення теплоти згорання збільшує пожежну небезпеку етерів, а саме:

- підвищується інтенсивність горіння: чим більша теплота згорання, тим більше енергії виділяється під час горіння., це призводить до швидшого підвищення температури в зоні пожежі;
- відбувається ускладнення гасіння пожежі: речовини з високою теплою згорання можуть потребувати більших зусиль для гасіння, більша кількість тепла може ускладнювати зниження температури до температури загасання;
- зростання ризику повторних загорянь: висока кількість тепла, що виділяється при горінні, може нагрівати сусідні об'єкти, збільшуючи ризик їх займання;
- підвищення токсичності продуктів горіння: при горінні речовин з високою теплою згорання часто виділяється більша кількість диму та токсичних продуктів згорання, що ускладнює евакуацію людей і роботу рятувальників;
- підвищений ризик вибуху: речовини з високою теплою згорання можуть сприяти утворенню вибухонебезпечного середовища, особливо за умов обмеженого простору або наявності певних концентрацій горючих речовин у повітрі.

Виходячи з отриманих даних, можемо зробити наступні висновки.

#### **Висновок.**

Досліджені етери гліцидолу містять у своїй структурі відносно великий вміст карбону та гідрогену і невеликий вміст кисню. Тому при їх горінні виділяється значна кількість теплоти. Це означає, що при виготовленні і застосуванні таких речовин повинні прийматися достатньо надійні протипожежні заходи. З теоретичної точки зору цікавим є вплив на теплоту утворення гліцидилових етерів будови їх алкоксильної частини. Зрозуміло, при утворенні цих сполук енергія, яка виділяється при утворенні зв'язків С-О, значною мірою витрачається на утворення зв'язків С-Н. Тому зменшення відсотку кисню в молекулі веде до зниження теплоти утворення. Цікавим, і поки що неясним, є вплив на теплоту згорання і на теплоту утворення, енергії напруги в епоксидциклі. Хоча можна констатувати, що в сполуках однакового кількісного складу і практично однакової будови заміна в алкілній частині н-Бутилу на трет.-Бутил, з його потужним індукційним ефектом, веде до зниження теплоти згорання і до відповідного збільшення теплоти утворення.

**Перспективи подальших досліджень.** Перспективними є дослідження впливу на теплоту згорання і на теплоту утворення, енергії напруги в епоксидциклі. Також плануються дослідження показників пожежної безпеки алкілгліцидних етерів, які досліджувались в даній роботі.

## **ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Paquin A.M. Epoxidverbindungen und Epoxidharze. Berlin. 1960. 964 p.
2. Geuskens G., Kanda M. Surface modification of polymers .1. Grafting initiated by photo-generated hydroperoxides. european polymer journal. 1991. vol. 27, no. 9. p. 877–879.
3. Bratychak M., Brostow W. Synthesis and properties of peroxy derivatives of epoxy resins based on Bisphenol A. 1. Effects of the presence of inorganic bases. Polymer Engineering and Science. 1999. Vol. 39, no. 8. P. 1541–1549.
4. Bratychak M. New Textbook "Materials: Introduction and Applications" by Witold Brostow & Haley E. Hagg Lobland, John Wiley & Sons 2017 / M. Bratychak, O. Shyshchak.

// Chemistry & Chemical Technology. - 2017. - Vol. 11, № 4. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Chemistry\\_2017\\_11\\_4\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Chemistry_2017_11_4_24).

5. Виникнення і розвиток горіння та вибуху. Припинення горіння. : підручник / [Г.І. Єлагін, Є.О. Тищенко, А.Г. Алексєєв, В.М. Нуянзін, А.О. Майборода] – Черкаси: черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобілля, НУЦЗ України 2020. – 444 с

6. G R., Handrick. Heats of Combustion of Organic Compounds G. Richard. Handrick. Industrial & Engineering Chemistry. 1956. Vol. 48, no. 8. P. 1366–1374.

7. Єлагін Г. І. Розрахунки і моделювання в теорії пожежовибухонебезпечності // Єлагін Г. І., Алексєєв А. Г., Кришталь М. А.// Навчальний посібник. Черкаси: АПБ, 2013.- 147 с.

8. Соколовський Д. А., Ютілова К. С., Швед О. М., Степанова Д. С. КАТАЛІТИЧНА АКТИВНІСТЬ [Fe(salophen)]Cl У РЕАКЦІЇ ЕПІХЛОРИДРИНУ З ОЦТОВОЮ КИСЛОТОЮ. XXV International Conference for Students, PhD Students and Young Scientists «Modern Chemistry Problems» 2024. – С. 161-163.

9. De Albuquerque, I.L.; Galeffi, C.; Casinovi, C.G.; Marini-Bettolo, G.B. Gazz. Chim. Ital. 1964, 94, 287-295

10. Zak, M.; Hurley, C. A.; Ward, S. I.; Bergeron, P.; Barrett, K.; Balazs, M.; Blair, W. S.; Bull, R.; Chakravarty, P.; Chang, C.; Crackett, P.; Deshmukh, G.; DeVoss, J.; Dragovich, P. S.; Eigenbrot, C.; Ellwood, C.; Gaines, S.; Ghilardi, N.; Gibbons, P.; Gradl, S. Journal of medicinal chemistry, 2013, 56 (11), 4764–4785.

## REFERENCES

1. Paquin A.M. Epoxidverbindungen und Epoxidharze. Berlin. 1960. 964 p.

2. Geuskens G., Kanda M. Surface modification of polymers .1. Grafting initiated by photo-generated hydroperoxides. european polymer journal. 1991. vol. 27, no. 9. p. 877–879.

3. Bratychak M., Brostow W. Synthesis and properties of peroxy derivatives of epoxy resins based on Bisphenol A. 1. Effects of the presence of inorganic bases. Polymer Engineering and Science. 1999. Vol. 39, no. 8. P. 1541–1549.

4. Bratychak M. New Textbook "Materials: Introduction and Applications" by Witold Brostow & Haley E. Hagg Lobland, John Wiley & Sons 2017 / M. Bratychak, O. Shyshchak. // Chemistry & Chemical Technology. - 2017. - Vol. 11, № 4. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Chemistry\\_2017\\_11\\_4\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Chemistry_2017_11_4_24).

5. Vynyknennia i rozvytok horinnia ta vybukhu. Prypynennia horinnia. : pidruchnyk / [H.I. Yelahin, Ye.O. Tyshchenko, A.H. Aliksieiev, V.M. Nuianzin, A.O. Maiboroda] – Cherkasy: cherkaskyi instytut pozhezhnoi bezpeky imeni Heroiv Chornobylia, NUTsZ Ukrainy 2020. – 444 s.

6. G R., Handrick. Heats of Combustion of Organic Compounds G. Richard. Handrick. Industrial & Engineering Chemistry. 1956. Vol. 48, no. 8. P. 1366–1374.

7. Yelahin H. I. Rozrakhunky i modeliuвання v teorii pozhezhovybukhonebezpechnosti // Yelahin H. I., Aliksieiev A. H., Kryshtal M. A.// Navchalnyi posibnyk. Cherkasy: APB, 2013.-147 s.

8. Sokolovskyi D. A., Yutilova K. S., Shved O. M., Stepanova D. S. KATALITYCHNA AKTYVNIST [Fe(salophen)]Cl U REAKTsII EPIKhLORHIDRYNU Z OTsTOVOIu KYsLOTOIu. XXV International Conference for Students, PhD Students and Young Scientists «Modern Chemistry Problems» 2024. – S. 161-163.

9. De Albuquerque, I.L.; Galeffi, C.; Casinovi, C.G.; Marini-Bettolo, G.B. Gazz. Chim. Ital. 1964, 94, 287-295

10. Zak, M.; Hurley, C. A.; Ward, S. I.; Bergeron, P.; Barrett, K.; Balazs, M.; Blair, W. S.; Bull, R.; Chakravarty, P.; Chang, C.; Crackett, P.; Deshmukh, G.; DeVoss, J.; Dragovich, P. S.; Eigenbrot, C.; Ellwood, C.; Gaines, S.; Ghilardi, N.; Gibbons, P.; Gradl, S. Journal of medicinal chemistry, 2013, 56 (11), 4764–4785.



*Vitalii Nuianzin, Ph.D. (ORCID: 0000-0003-4785-0814)*

*Artem Maiboroda, Ph.D. (ORCID: 0000-0001-6108-9772)*

*Olha Melnyk, Ph.D. (ORCID: 0000-0002-9671-108X)*

*Olena Danyk, Ph.D. (ORCID: 0009-0003-6849-3403)*

*Serhii Vedula, Ph.D. (ORCID: 0000-0001-6191-8737)*

*Dmytro Lesechko, Ph.D. (ORCID: 0000-0000-0000-0000)*

*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes  
of National University of Civil Protection of Ukraine*

## **DETERMINATION OF THE HEAT OF FORMATION OF ALKYL GLYCID ETHERS FOR THE ASSESSMENT OF THEIR FIRE HAZARD**

Epoxy compounds, i.e. compounds that contain a three-membered ring of two hydrogen atoms and one oxygen atom, were synthesized in the middle of the last century and were initially used only as starting products for epoxy resins [1]. But over time, the scope of their application has expanded significantly. In particular, glycidol and its derivatives, in which the hydroxyl hydrogen atom is replaced by alkyl groups, attracted the attention of the chemical industry. The history of production and use of glycidol ethers (epoxy-containing ethers) dates back only a few dozen years. But today they are widely used in industry, in particular as solvents, semi-products for the synthesis of other chemical products and, in particularly large quantities, as active thinners and modifiers of epoxy resins and other polymer materials [2-4]. Theoretical and laboratory studies of the properties of these compounds do not keep up with the development of the scale of their manufacture and application. Meanwhile, most of them belong to combustible substances, and the lower representatives (methylglycidol and ethyl, propyl and n-butyl derivatives) may also be flammable. This necessitates a detailed study of their thermodynamic properties, most of which are based on the heat of compound formation. In this work, this indicator was determined for the four most typical representatives through the experimental determination of their heat of combustion and subsequent recalculation according to Hess's law.

**Key words:** Heat of formation, heat of combustion, glycidol ethers.