

УДК 614.842

*Р.В. Ліхнівський, канд. хім. наук***ГАЛОНИ: ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА СТАН ЗАСТОСУВАННЯ**

Проаналізовано існуючі озоноруйнівні та альтернативні хладони. Представлено їх екологічні, токсикологічні та вогнегасні характеристики. Висвітлено хронологію подій з охорони озонового шару з моменту висунення теорії негативного впливу на нього галонів.

Ключові слова: галони альтернативні і озононебезпечні, вогнегасні характеристики, GWP – потенціал глобального потепління, ALT – тривалість існування в атмосфері, ODP – потенціал озоноруйнівної дії, токсикологічні характеристики NOAEL і LOAEL.

*R. Likhniivskyi, Cand. of Sc. (Chem.)***HALONS: CHARACTERISTICS AND CONDITION OF USE**

Current ozone depleting halons and their alternatives are being analyzed. Their environmental, toxicological, and fire extinguishing characteristics are submitted. Chronology of appropriate events for the ozone layer protection beginning from the moment of bringing forward theory of halons negative influence on it is highlighted.

Keywords: alternative and ozone depleting halons, fire extinguishing characteristics, GWP – Global Warming Potential, ALT – Atmospheric lifetime, ODP – Ozone Depletion Potential, toxicological characteristics NOAEL and LOAEL.

Газові вогнегасні речовини набули широкого застосування у системах пожежогасіння та зайняли важливу нішу в переліку вогнегасних речовин, що використовують для локалізації та приборкання пожеж завдяки ефективності. В кінці XIX століття почали використовувати як вогнегасну речовину вуглекислий газ, а на початку XX – вуглекислотні установки пожежогасіння у США, Англії та Німеччині, які набули широкого застосування у 30-х роках.

Галони або хладони – це більш сучасні вогнегасні речовини. У XX столітті вони обмежено використовувались в ручних вогнегасниках, і лише у США в 50-х роках були проведені дослідження, які дали змогу використовувати в установках пожежогасіння галон 1301. У колишньому СРСР широко використовувався галлон 2402 (хладон 114B2) і менше – галони 1301 та 1211.

Метою роботи було проведення огляду ринку існуючих галонів та тенденцій у розробці нових, їх властивостей, а також висвітлення хронології подій з охорони озонового шару.

Галони здатні до гальмування процесу горіння, що пов'язують з наявністю в їх молекулах атомів броміду Br, хлору Cl та фтору F. При подальшому вивченні цих сполук була створена теорія щодо причетності галонів до руйнування стратосферного озону внаслідок хімічної взаємодії. Цей ефект було вперше обговорено Molina і Rowland на початку 70-х років минулого століття [1]. Суттєвий вплив на озоновий шар здійснюють хлор- і бромвмісні речовини – хладони (хлорфторвуглеводні), або фреони (за торговельними марками американської компанії DuPont, однієї з найбільших виробників подібних речовин).

У березні 1985 року було прийнято Віденську конвенцію про охорону озонового шару, що набула чинності у вересні 1988 року. Підписантами конвенції стали 20 країн. На кінець липня 1993 року кількість сторін Віденської конвенції сягнула 125 країн світу. У 1987 році прийнято Монреальський протокол, у якому передбачено повне припинення виробництва розвинутими країнами озоноруйнівних хладонів (R11, R12, R113, R114, R115) до 1 січня 1996

року і бромвмісних галонів (12В1, 13В1 і 114В2) до 1 січня 1994 року. Країнам, що розвиваються, було надано відтермінування на десять років.

У таблиці 1 представлено хронологію прийняття угод з охорони озонowego шару.

Таблиця 1 – Перелік подій стосовно охорони озонowego шару

Рік	Подія	Резюме
1974	Публікація перших обґрунтувань щодо впливу озоноруйнівних речовин	Скорочення виробництва озоноруйнівних речовин у США
1985	Прийняття Віденської конвенції і її ратифікація СРСР	Конвенція ні до чого не зобов'язувала і мала рамковий характер
1987	Монреальський протокол щодо речовин, що руйнують озоневий шар (прийнятий СРСР у 1988 році)	Збереження на рівні 1987 року виробництва найбільш поширених хлорфторвуглеводнів – хладонів 11, 12, 113, 114, 115 та скорочення їх виробництва до 1993 року на 20%
1990	Лондонська поправка до Монреальського протоколу	До списку озоноруйнівних речовин додано метилхлороформ, чотирехлористий вуглець і бромхлорвуглеводні (галони). Введено термін «перехідні речовини», тобто сполуки, що впливають на озоневий шар, термін виробництва яких не був обмежений. У відповідності до Лондонської поправки СРСР повинен був припинити виробництво озоноруйнівних речовин до 1 січня 1996 р.
1992	Копенгагенська поправка до Монреальського протоколу	Розширено перелік речовин, застосування яких регулює Монреальський протокол. Додано галогеновані розчинники та гідрофторхлорвуглеводні.
1997	Монреальська поправка до Монреальського протоколу	Створення глобальної системи ліцензування експорту й імпорту. Скориговано (у сторону скорочення) графік припинення виробництва метилброміду. Введено заборону на імпортно-експортні операції з цією речовиною з країнами, які не є Сторонами Копенгагенської поправки з 10 листопада 2000 р.
1999	Пекінська поправка до Монреальського протоколу	Вжито заходів регулювання поетапного скорочення виробництва гідрофторхлорвуглеводнів, хлорфтор-вуглеводнів і галонів для країн, що розвиваються, а також припинення виробництва і споживання бромхлорметана у всіх країнах з 1 січня 2002 року. Виробництво гідрохлорфторвуглеводнів було заморожено на рівні 1 січня 2004 р. для Сторін Статті 2 і на рівні 1 січня 2016 р. для Сторін Статті 5.
2007	Монреальське коригування до Монреальського протоколу	Введено додаткові, суворіші терміни поетапного припинення споживання гідрохлорфторвуглеводнів (в період з 2010 р. по 2014 р.).
2011	<i>Північноамериканська поправка (не прийнята!). Проект поправки до Монреальському протоколу спільно запропонований Канадою, Мексикою і США.</i>	На теперішній час Північноамериканські поправки на стадії розгляду. Вони були внесені спільно Канадою, Мексикою і США та підтримані багатьма розвинутими країнами. Запропоновані поправки стосуються поетапного скорочення споживання гідрофторвуглеводнів. Ці речовини не руйнують озоневий шар, але є парниковими газами та сприяють змінам глобальної кліматичної системи. Гідрофторвуглеводні почали широко застосовуватися і впливати на клімат внаслідок відмови від використання озоноруйнівних речовин. Основною ідеєю цієї поправки є запровадження заходів регулювання (виробництво, імпорт й експорт) стосовно гідрофторвуглеводнів. Запропоновано додати в групу I Додатка С Монреальського протоколу 100-річний GWP для ряду гідрохлорфторвуглеводнів, а також новий Додаток F, що містить гідрофторвуглеводні та гідрофторолефіни.

У 1991 році Україна, Білорусь і Росія визнали рішення СРСР 1987 року стосовно Монреальського протоколу і приєдналися до нього.

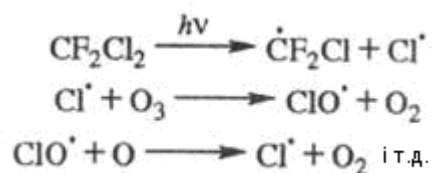
Сторонами Віденської конвенції і Монреальського протоколу є 195 країн, тобто майже усе світове співтовариство. Тому у багатьох країнах почалася розробка нових, екологічно безпечних хладонів з необхідними експлуатаційними властивостями, здатними до руйнування в атмосфері з утворенням малоактивних речовин.

Великі західні компанії, наприклад DuPont, Great Lakes, ICI та ін. почали пошук альтернативних озонобезпечних речовин та розробку технологій їх виробництва. Наступним етапом було створення дослідно-промислових виробництв цих речовин і в подальшому організація великих потужностей. Компанія DuPont завершила перехід на озонобезпечні речовини у 1988 році і почала домінувати на ринку хладонів. До 1999 року загальний об'єм вироблених у США озонобезпечних хладонів становив 21,1 млн метричних тонн за вуглець-еквівалентом (дані IPCC Special Report on emission Scenarios, Fenhann /2000).

Виробництво у Росії озоноруйнівних хладонів, зокрема 1301 і 1211, зупинено з 1994 року, а 114B2 – з грудня 2000-го.

На теперішній час на теренах пострадянського простору хладони продовжують використовувати в якості неліквідів до їх фізичного існування, з періодичною регенерацією та контролем якості. В Україні відсутнє виробництво хладонів тому триває експлуатація озоноруйнівних, але й частка імпорту озонобезпечних поступово зростає.

Механізм руйнування озонowego шару можна представити таким чином. При ультрафіолетовому опроміненні за наявності O_2 хладони з вмістом атомів броду, хлору розкладаються з утворенням радикалів, які є, як відомо, надзвичайно реакційноздатними. Далі проходить реакція диспропорціонування з утворенням фторкарбонільних сполук, фторолефінів, галогенів та ін. Хлорвмісні хладони виділяють атомарний хлор, який взаємодіє з молекулами озону:



За подібною схемою відбувається розклад молекул бромвмісного хладону. У стратосфері подібні хімічні взаємодії призводять до зниження концентрації озону і появи так званих озоневих дір. Речовини, що мають вплив на озоневий шар, класифікуються в рамках Монреальського протоколу як озоноруйнівні та перехідні:

- Озоноруйнівні – це хлорфторвуглеводні, чотирихлористий вуглець, метилхлороформ, галони, бромистий метил з потенціалом озоноруйнівної дії більше 0,1. Регулюючий документ Монреальського протоколу – додатки А, В, Е.
- Перехідні – гідрохлорфторвуглеводні з потенціалом озоноруйнівної дії менше 0,1. Регулюючий документ Монреальського протоколу – додаток С.

Тому екологічно безпечні хладони не повинні містити атомів Br чи Cl або мають розкладатися не досягаючи озонowego шару атмосфери. Здатність до швидкого розкладу в атмосферних умовах притаманна неповністю заміщеним хлорфторвуглеводням та бромхлорфторвуглеводням. Ця властивість зумовлена наявністю в молекулах цих речовин атомів водню [2].

Критерії, яким повинні відповідати нові хладони, як альтернативні озоноруйнівним, – це вогнегасна ефективність, екологічна безпека та низький шкідливий вплив на людину.

Поштовхом до розроблення озонобезпечних галонів, як зазначалося вище, стало підписання і ратифікація Монреальського протоколу, відповідно до якого припинилося виробництво екологічно небезпечних галонів з поступовою заміною на альтернативні. Так, було розроблено галони, що належать до неповністю заміщених фторхлорвуглеводнів, неповністю заміщених фторвуглеводнів, перфторованих вуглеводнів, йодфторвуглеводнів та

фторованих кетонів, із яких створено нові хімічні класи: HCFC_S – гідрохлорфторвуглеводні; FC_S(PFC_S) – перфторвуглеводні; HFC_S – гідрофторвуглеводні; FIC_S – фторйодвуглеводні; FK_S – фторовані кетони; HBFC_S – галогенолефіни.

Використання будь-яких синтетичних хімічних сполук, що накопичуються в атмосфері, має потенціальний ризик змін атмосферної рівноваги. Слід зазначити, що клас PFC_S виключений з оновленого звіту за 2002 рік і додано інший клас заміників озоноруйнівних речовин – фторкетони (FK).

HCFC_S мають набагато менший вплив на стратосферний озон, ніж галогени. Однак цей вплив не дорівнює нулю. З цієї причини можливе припинення виробництва цих хімічних сполук і заборона на застосування для протипожежного захисту.

PFC_S повністю фторовані сполуки на відміну HCFC_S і HFC_S є більш прийнятними до застосування. Вони не горючі, мають низьку токсичність і не виснажують стратосферний озоновий шар. Певне занепокоєння спричиняє вплив цих сполук на навколишнє середовище за рахунок комбінації надзвичайно тривалого існування в атмосфері (ALT) і високим потенціалом глобального потепління (GWP). Наразі продаж перфторованих вуглеводнів не здійснюється.

HFC_S набувають все більшого значення у заміні озоноруйнівних речовин. Вони не руйнують озон, як і HCFC_S, мають меншу тривалість атмосферного життя ніж PFC_S. Однак, як зазначено вище, їх визнано парниковими газами, що сприяють глобальному потеплінню. Були отримані 1,1,1,2,3,3,3-гептафторпропан (HFC-227ea) та пентафторетан (HFC-125) які набули найбільшого застосування як альтернативні галони.

Один представник класу FIC_S – CF₃I утворює відносно велику кількість йоду. Кількість побічних продуктів залежить від інтенсивності потоку у полум'я маси інгібітора та тривалості гасіння. В результаті гасіння низькими концентраціями вогнегасної речовини утворюється більше побічних продуктів.

До класу FK_S кетонів належить додекафтор-2-метил-пентан-3-он CF₃CF₂(O)CF(CF₃)₂. Фторований кетон має відмінні екологічні характеристики та непогані у порівнянні з іншими галонами токсикологічні властивості.

Представником класу HBFC_S є 3,3,3-трифторо-2-бром-проп-1-ен або 2-ВТР – новий альтернативний галон з відмінними характеристиками. Речовина проходить випробування для застосування у ручних вогнегасниках.

Як зазначалося вище, галони негативно впливають на навколишнє середовище, що оцінюються такими екологічними характеристиками: ODP – потенціал озоноруйвної дії; GWP – потенціал глобального потепління; ALT – тривалість існування в атмосфері. У таблиці 2 наведено значення цих характеристик за даними [3, 4, 5], за якими також можна оцінити еволюцію галонів від 1301 до нового 2-ВТР в екологічному аспекті.

Таблиця 2 – Екологічні характеристики газових вогнегасних речовин.

Назва ГВП	ODP	GWP, 100 рік	ALT, рік
1	2	3	4
галон 1301	10	7,140	65
галон 1211	3,0	1,890	16
галон 2402	6,4	1,640	22
HCFC-124	0,022	619	6.1
HCFC Blend A			
HCFC-22	0,055	1,79	11,9
HCFC-123	0,02	77	1,4
HCFC-124	0,022	619	6,1
HCFC Blend B			
HFC-134a	0	1,43	13,8
HFC-125	0	3,42	29
CO ₂		1	

Продовження таблиці 2

1	2	3	4
HCFC Blend C			
HCFC-123	0,02	77	1,4
HCFC-124	0,022	619	6,1
HFC-134a	0	1,37	13,8
Blend D			
HCFC-123	0,02	77	1,4
HCFC-22	0,055	1,79	11,9
HCFC-124	0,022	619	6,1
HFC-23	0.0	14,2	260
HFC-125	0.0	3,5	29
HFC-227ea	0.0	3,58	33
HFC-236fa	0.0	9,82	220
FC-218	0.0	8,83	2,600
FC-3-1-10	0.0	8,86	2,600
FIC-1311	0.0001	1	7 днів
FK-5-1-12	0	1	7-14 днів
2-BTP	0.0028	0.0050	4,3-7днів

Важливими характеристиками газових вогнегасних речовин є дані щодо NOAEL (No Observed Adverse Effect Level) та LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level). NOAEL – це концентрація, за якої в умовах спеціальних тестів не спостерігається шкідливий вплив на людину. LOAEL – найменша концентрація, за якої в умовах спеціальних тестів спостерігається шкідливий вплив на людину. Дані щодо токсичності галонів представлені у табл. 3.

Таблиця 3 – Токсикологічні властивості NOAEL і LOAEL комерційних газових вогнегасних речовин.

Назва ГВР	Хімічна назва, склад ГВР	NOAEL, % об.	LOAEL, % об.
1	2	3	4
галон 1301	CBrF ₃ , бромтрифторметан	5,0	7,5
галон 1211	CBrClF ₂ , бромхлордифторметан	0,5	1,0
галон 2402	CBrF ₂ CBrF ₂ , 1,1-дибромтетрафторетан		
HFC-23	CHF ₃ , трифторметан	30	>50
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃ , 1,1-дихлор-2,2,2-трифторетан	1,0	2,0
HCFC-124	CHFClCF ₃ , 1-хлор-1,2,2,2-тетрафторетан	1,0	2,5
HFC-125	C ₂ H ₅ F ₅ , пентафторетан	7,5	10,0
HCFC Blend A	HCFC-22, CHClF ₂ , хлордифторметан, 82%мас. HCFC-124, CHFClCF ₃ , 1-хлор-1,2,2,2-тетрафторетан, 9,5%мас. HCFC-123, CHCl ₂ CF ₃ , 1,1-дихлор-2,2,2-трифторетан, 4,75%мас. Ізопропеніл-1-метилциклогексан, 3,75%мас.	10	>10
HCFC Blend B	HFC-134a, CH ₂ FCF ₃ , 1,1,1,2-тетрафторетан, 86 %мас HFC-125, C ₂ H ₅ F ₅ , пентафторетан, 9%мас. CO ₂ , діоксид вуглецю, 5%мас.	5,0	7,5
HCFC Blend C	HCFC-123, CHCl ₂ CF ₃ , 1,1-дихлор-2,2,2-трифторетан HCFC-124, CHFClCF ₃ , 1-хлор-1,2,2,2-тетрафторетан HFC-134a, CH ₂ FCF ₃ , 1,1,1,2-тетрафторетан	1,0 1,0 4,0	2,0 2,5 8,0

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
HCFC Blend D HCFC-123	добавки і HCFC-123, CHCl_2CF_3 , 1,1-дихлор-2,2,2-трифторетан	1,0	2,0
HFC-227ea	$\text{CF}_3\text{CHF}_2\text{CF}_3$, 1,1,1,2,3,3,3-гептафторпропан	9,0	10,5
HFC-236fa	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_3$, 1,1,1,3,3,3-гексафторпропан	10,0	15,0
FC-218	$\text{CF}_3\text{CF}_2\text{CF}_3$, перфторпропан	30	40
FC-3-1-10	$\text{CF}_3\text{CF}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$, перфторбутан	40	>40
FC-5-1-14	$\text{CF}_3(\text{CF}_2)_4\text{CF}_3$, перфторгексан	40	>40
FIC-131I	CF_3I , йодтрифторметан	0,2	0,4
FK-5-1-12	$\text{CF}_3\text{CF}_2(\text{O})\text{CF}(\text{CF}_3)_2$, додекафтор-2-метил-пентан-3-он	10	>10
ВТР	2-бром-3,3,3-фторпропен	0,5	1,0

Характеристики альтернативних газових вогнегасних речовин, що рекомендовані до застосування у звіті за 2010 рік Технічним комітетом по заміні галонів, а саме: мінімальна вогнегасна концентрація та мінімальна флегматизувальна концентрація (табл. 4).

Таблиця 4 – Вогнегасні характеристики альтернативних галонів.

Назва газової вогнегасної речовини	Мінімальна розрахункова концентрація, клас А, % об.	Мінімальна розрахункова концентрація, клас В, % об.	Мінімальна флегматизувальна концентрація метан/повітря, %об.
галон 1301	5,0	5,0	4,9
HCFC Blend A HCFC-22 HCFC-123 HCFC-124	7,8	13,0	20,5
HCFC Blend B HFC-134a HFC-125 CO_2	14,7	14,7	-
HCFC-124*	-	8,7	-
HFC-23	16,3	16,4	20,2
HFC-125	11,2	12,1	
HFC-227ea	7,9	9,0	8,8
HFC-236fa	8,8	9,8	-
FIC-131I	4,6	4,6	7,2 пропана
FK-5-1-12	5,3	5,9	8,8

* HCFC-124 не рекомендований для житлових приміщень

Хладони, як відомо, представляють собою галогеновані хімічні сполуки з різним ступенем заміщення атомів водню, тому не припиняються дослідження, спрямовані на одержання нових ефективних вогнегасних речовин. Останнім часом об'єктом вивчення є альтернативна газова вогнегасна речовина 2-ВТР, CAS 1514-82-5, яка представляє собою ненасичений 2-бром-3,3,3-трифторпропен, $\text{CF}_3\text{CBr} = \text{CH}_2$. Вище, у таблицях 1, 2, представлені дані про низьку токсичність та відмінні екологічні характеристики цієї речовини. Окремі роботи з використання альтернативного 2-ВТР в ручних вогнегасниках були виконані ще у 2004 році. Тоді не було досягнуто блискучих результатів у вогнегасній ефективності. Інтерес до 2-ВТР відновився і, знову ж таки, через можливість використовувати цей засіб в ручних вогнегасниках, розміри яких відповідають розміру

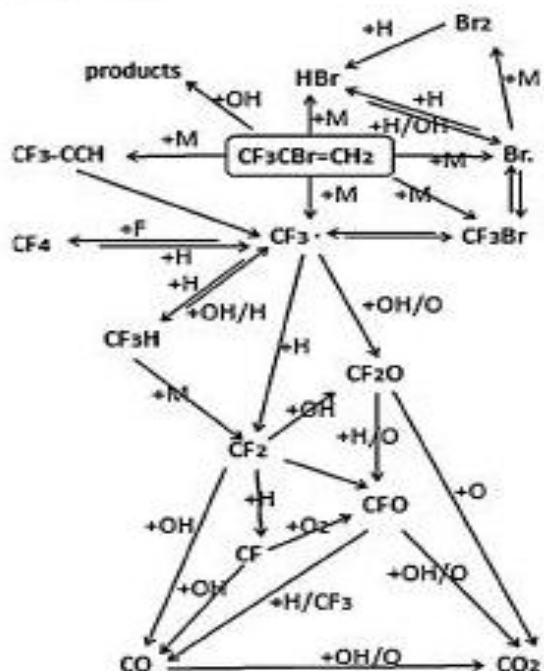
циліндра в якості стандартного обладнання літаків Boeing. Ця можливість була підтверджена результатами випробувань, проведених в лабораторії Underwriters (UL) у 2009 році в рамках спільної програми компаній American Pacific і Boeing програми. На підставі одержаних результатів, 2-ВТР додатково оцінили з точки зору комерціалізації. Залишилося провести ряд тестів з токсикології для затвердження в рамках програми US EPA SNAP. Якщо тестування будуть успішними, то ця вогнегасна речовина стане комерційно доступною.

Було відзначено, що ця речовина може реагувати з повітрям і вологою, тому для того щоб підтримувати стабільність в умовах зберігання були розроблені стабілізуючі добавки.

Для більшості галонів серед недоліків відзначають здатність утворювати при взаємодії з полум'ям або контакті з розжареною поверхнею надзвичайно шкідливі побічні продукти термічного розкладу (Br_2 , Cl_2 , COCl_2 , COF_2 , COBr_2 , CO), а за наявності вологи – галогеноводні HF , HCl та HBr . Утворення таких сполук зафіксували автори [7], досліджуючи термічний розклад галону 1301, пентафторетану HFC-125 , гептафторпропану HFC-227ea і додекафтор-2-метилпентан-3-ону FK-5-1-12 . Методами ІЧ-спектроскопії та FTIR було зафіксовано утворення CO , і CO_2 при термічному розкладі усіх чотирьох вогнегасних речовин. Також утворюються COF_2 , HF , кількість яких залежить від норми витрати вогнегасної речовини. При наближенні до вогнегасної концентрації збільшується кількість COF_2 , при відносно низьких витратах утворюється HF . Для галону 1301, крім зазначених продуктів розкладу, виявлена значна кількість HBr .

Для альтернативного галону 2-ВТР автори [8] дослідили процес термічного розкладу експериментально і теоретично, сумарний механізм якого наведено нижче.

- | | | |
|---|--|--|
| 1. $\text{CF}_3\text{Br} \rightarrow \text{CF}_3 + \text{Br}$ | 9. $\text{CF}_3 + \text{F} \rightarrow \text{CF}_4$ | 17. $\text{CF} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CFO} + \text{O}$ |
| 2. $\text{CF}_3 + \text{H} \rightarrow \text{CF}_3\text{H}$ | 10. $\text{CF}_4 + \text{H} \rightarrow \text{CF}_3 + \text{HF}$ | 18. $\text{CF} + \text{OH} \rightarrow \text{CO} + \text{HF}$ |
| 3. $\text{CF}_3\text{H} \rightarrow \text{CF}_2 + \text{HF}$ | 11. $\text{CF}_2 + \text{O} \rightarrow \text{CO} + 2\text{F}$ | 19. $\text{CFO} + \text{CF}_3 \rightarrow \text{CF}_4 + \text{CO}$ |
| 4. $\text{CF}_3\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{CF}_3 + \text{H}_2$ | 12. $\text{CF}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{CF}_2\text{O} + \text{F}$ | 20. $\text{CFO} + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{HF}$ |
| 5. $\text{CF}_3\text{H} + \text{OH} \rightarrow \text{CF}_3 + \text{H}_2\text{O}$ | 13. $\text{CF}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CF} + \text{HF}$ | 21. $\text{CFO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{HF}$ |
| 6. $\text{CF}_3 + \text{OH} \rightarrow \text{CF}_2\text{O} + \text{HF}$ | 14. $\text{CF}_2 + \text{O} \rightarrow \text{CFO} + \text{F}$ | 22. $\text{CFO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{F}$ |
| 7. $\text{CF}_3 + \text{H} \rightarrow \text{CF}_2 + \text{HF}$ | 15. $\text{CF}_2\text{O} + \text{H} \rightarrow \text{CFO} + \text{HF}$ | 23. $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ |
| 8. $\text{CF}_3 + \text{O} \rightarrow \text{CF}_2\text{O} + \text{F}$ | 16. $\text{CF}_2\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{F}$ | 24. $\text{CO} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{CO}_2$ |



Як видно із представленого механізму 2-бром-3,3,3-трифторпропену, при контакті з полум'ям або розжареною поверхнею 2-ВТР практично не дає побічних шкідливих продуктів розкладу. Одержані експериментальні дані вказують на відносну стабільність 2-ВТР як

вогнегасної речовини з температурою розкладу 600°C . В інтервалі $600 - 800^{\circ}\text{C}$ розклад збільшується з підвищенням температури. Методом газової хромато-мас-спектрометрії були ідентифіковані в незначній кількості CF_3CCl і CF_3Br . Автори пов'язують хорошу вогнегасну здатність з наявністю Br і CF_3 , а також зв'язані з ними радикали, що обривають ланцюговий механізм реакції горіння. Властивості 2-ВТР дозволяють зробити висновок, що цей галон є ще одним ефективним замінником озоноруйнівних газових вогнегасних речовин.

Таким чином, слід констатувати, що на теперішній час отримано ефективні альтернативні галони, які поступово заміщують озононебезпечні. Тривають дослідження з отримання нових з покращеними характеристиками галонів. Одержано галон 2-ВТР з відмінними екологічними характеристиками. Новий галон знаходиться на стадії впровадження. Аналізуючи поправки, що вводилися до Монреальського протоколу, можна зробити висновок, що світове співтовариство вживає дедалі суворіших заходів щодо виробництва і обігу галонів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Molina M.J., Rowland F.S. Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom-Catalyst Destruction of Ozone // *Nature*. – V. 249, 1974.
2. Копылов Н.П. Проблемы газового пожаротушения в свете требований Монреальского протокола по хлорфторуглеродам // *Материалы 11-й науч. конф. «Проблемы предотвращения и тушения пожаров на объектах народного хозяйства»*. – М., 1992. – С.16-24.
3. Greenhouse gas protocol. Global Warming Potentials. // 4th report, 2007 – 5 p.
4. Jonathan S. Nimitz, Vaughn Shell, Stephanie R. Skaggs, Edward A. Walters. // Progress toward replacing halon 2402 for thrust vector control. – nist.gov/el/fire_research/upload/R0301003.pdf
5. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. 2010 Report of the Halons Technical Options Committee (HTOC) 2010 Assessment. UNEP, 2011 – p. 189
6. Options to the Use of Halons for Aircraft Fire Suppression Systems—2012 Update // U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. - Final Report, 02.2012. – 102 p. Andersson B., Blomqvist P. Experimental study of thermal breakdown products from halogenated extinguishing agents // *Fire Safety Journal*. – V. 46 (3), 2011 – P. 104–115.
7. Xiaomeng Zhou, Weiwang Chen, Mingyong Chao, Guangxuan Liao. The study of thermal decomposition of 2-bromo-3,3,3-trifluoropropene and its fire-extinguishing mechanism// *Journal of Fluorine Chemistry*. – №153, 2013 – P. 101–106.

