

УДК 614.844.1

*В.О. Дунюшкін, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., С.Ю. Огурцов, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., А.В. Антонов, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., С.З. Цимбалістий*

## **ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ГАЗОВОЇ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ ДЛЯ ФЛЕГМАТИЗАЦІЇ ОБ'ЄМІВ «СУХИХ» ВІДСІКІВ РАКЕТИ-НОСІЯ**

Наведено результати аналітичних досліджень з обґрунтування вибору газової вогнегасної речовини для флегматизування газового середовища з наявністю парів авіаційного пального JET-A1. Обґрунтовано застосування азоту, розрахована мінімальна флегматизувальна концентрація якого становить 39,2 % об.

*Ключові слова:* флегматизація, авіаційне пальне JET-A1, азот.

*V. Duniushkin, Cand of Sc. (Eng.), Sen. Res., S. Ogurtsov, Cand of Sc. (Eng.), Sen. Res., A. Antonov, Cand of Sc. (Eng.), Sen. Res., S. Csimbalystiy*

## **THE GROUND OF CHOICE OF GAS FIRE-EXTINGUISHING MATTER TO INERT OF VOLUMES OF «DRY» COMPARTMENTS OF ROCKET-TRANSMITTER**

There are presented the results of analytical researches for the choice of gas fire-extinguisher matter to inert of gas environment with a presence of aviation fuel's vapor type JET-A1. It is grounded the application of nitrogen with the calculation of minimum inert concentration which is 39,2 % vol.

*Keywords:* inert, aviation fuel type JET-A1, nitrogen.

Забезпечення пожежо-, вибухобезпечного середовища у середині технологічного обладнання може досягатись одним з найбільш поширених і універсальних методів – методом флегматизації, що базується на дії газової вогнегасної речовини на область займання пального в суміші з окиснювачем. Цей метод застосовується коли неможливо уникнути пожежо-, вибухонебезпечних концентрацій окисника та горючої речовини, або з метою запобігання аварійній ситуації.

Представлені результати отримані в ході досліджень, які проводились з метою наукового обґрунтування робочих параметрів системи попередження пожежі та вибуху (флегматизування) "сухих" відсіків ракети-носія під час польоту.

Об'єктом досліджень виступала система попередження пожежі та вибуху (флегматизування) "сухих" відсіків ракети-носія.

Предмет дослідження – вплив робочих параметрів системи попередження пожежі та вибуху (флегматизування) "сухих" відсіків ракети-носія на ефективність її роботи.

Для досягнення зазначеної мети, зокрема, вирішувались такі задачі:

- провести аналітичні дослідження джерел науково-технічної інформації з питань розробки та створення систем протипожежного захисту об'єктів з наявністю замкнених і напівзамкнених технологічних об'ємів з газовими горючими середовищами, а також флегматизування таких середовищ;

- провести теоретичні дослідження з визначення типу та необхідної кількості (концентрації) вогнегасної речовини – флегматизатора.

Для теоретичного обґрунтування вибору газової вогнегасної речовини для системи попередження пожежі та вибуху (флегматизування) "сухих" відсіків ракети-носія було застосовано такий метод дослідження як наукове узагальнення та систематизація даних, отриманих в результаті аналізування нормативно-методичної літератури та інших джерел науково-технічної інформації.

Вихідними даними для створення системи попередження пожежі та вибуху передбачено:

- забезпечити захист «сухих» відсіків ракети-носія, об'єм яких становить 17 м<sup>3</sup>, 12 м<sup>3</sup> та 37 м<sup>3</sup> на стартовій позиції та у польоті протягом роботи першої ступені (≈140 с);

- до об'єму «сухих» відсіків можливе надходження парів авіаційного (ракетного) пального Jet-A1 та кисню;

- «сухі» відсіки обладнані автоматичними дренажними клапанами, які, за визначеного тиску автоматично з'єднують об'єми відсіків з навколишнім середовищем.

У загальному випадку вибір газової вогнегасної речовини (ГВР) під час створення системи газового пожежогасіння або флегматизування ґрунтується на результатах аналізу таких критеріїв:

- безпека людей;
- техніко-економічні показники;
- збереження обладнання та матеріалів;
- обмеження щодо застосування;
- дія на навколишнє середовище;
- можливість видалення ГВР після застосування.

Суттєву різницю між системами протипожежного захисту, призначеним для пожежогасіння та для флегматизування об'єму захищуваного об'єкта характеризують такі показники як тривалість подавання ГВР та тривалість підтримування необхідної концентрації ГВР.

В разі виникнення пожежі в захищуваному об'ємі, система газового пожежогасіння повинна забезпечити подавання ГВР у найкоротший термін, тобто з максимальною інтенсивністю для створення нормативної вогнегасної концентрації. Згідно з вимогами ДСТУ 4466-1 [1] зріджені ГВР (практично всі інгібітори – фторвуглеводні) повинні бути подані не більше ніж за 10 с у кількості, яка забезпечує утворення у захищуваному об'ємі не менше 95% нормативної вогнегасної концентрації (за температури 20оС), а незріджені ГВР (інертні розріджувачі, за виключенням діоксиду вуглецю) – не більше ніж за 60 с. При цьому, тривалість підтримування вогнегасної концентрації (час витримування), повинна становити не менше 10 хв, для забезпечення чого, в разі необхідності, застосовують подовжене подавання ГВР. Така необхідність може виникати у разі суттєвої різниці між густиною атмосфери захищуваного об'єму та густиною поданої ГВР, що призводить до швидкого розшарування газового середовища та утворення локальних зон, в яких концентрація ГВР падає нижче нормативного значення.

Для систем призначених для флегматизування захищуваного об'єму, як правило, не встановлюють граничні значення тривалості подавання ГВР, якщо це не пов'язано з аварійним утворенням вибухонебезпечного середовища, яке необхідно швидко інертизувати. Слід відзначити, що достатньо широкого поширення набуло застосування технологій флегматизування пожежо-, вибухонебезпечного середовища на об'єктах видобутку вугілля, а також у резервуарних парках для зберігання нафти на нафтопродуктів [2-4]. При цьому, у якості флегматизувальної речовини, як правило, застосовується азот, в тому числі отримуваний із застосуванням мембранної технології [5, 6]. Це пояснюється, в тому числі тим, що азот є достатньо доступною і відносно недорогою речовиною, технології його отримання з повітря, а також зберігання та транспортування добре відпрацьовані, а при додаванні азоту до повітря, яке містить не менше 78 % цієї речовини, утворюється досить однорідне за густиною газове середовище, що практично не можливо в разі застосування ГВР групи інгібіторів або діоксиду вуглецю (див. дані табл.1).

Слід відзначити, що в результаті досліджень, присвячених виявленню особливостей функціонування та ефективності систем газового пожежогасіння (наприклад [5]), а також призначених для флегматизування пожежо-, вибухонебезпечних об'єктів, виявлено, що при подаванні однакової кількості азоту, концентрація кисню у негерметичному об'ємі знижується до значень, менших ніж у герметичному [9]. Також, в результаті досліджень швидкості заміщення інертного середовища киснем повітря після закінчення подавання інертного газу встановлено [10], що чим вище молекулярна маса інертного газу, тим з більшою інтенсивністю це інертне середовище заміщується киснем за наявності отворів зверху або знизу резервуара.

Таблиця 1 – Основні характеристики деяких газових вогнегасних речовин

Характеристика	Газова вогнегасна речовина									
	Діоксид вуглецю	Трифтор-йодметан	Хладон 125	Хладон 227ea	Хладон 23	Азот	Аргон	Суміш 50% Азоту + 50% аргону	Інерген	
Варіанти назви	Вуглекислота	Трифтор-йодметан	Пентафторетан, HFC 125	Гептафторпропан, HFC 227ea FM 200	Трифторметан, HFC 23	IG-100	IG-01	IG-55	IG 541	
Хімічна формула або хімічний склад (% об.)	CO <sub>2</sub>	CF <sub>3</sub> I	C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> H	C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> H	CF <sub>3</sub> H	N <sub>2</sub>	Ar	N <sub>2</sub> (50±5) Ar (50±5)	N <sub>2</sub> (52±3,2) Ar (40±2,3) CO <sub>2</sub> (8±0,4)	
ДСТУ	ДСТУ 5092; ДСТУ 4578	ДСТУ 3958; ДСТУ 4466-2	ДСТУ 3958; ДСТУ 4466-8	ДСТУ 3958; ДСТУ 4466-9	ДСТУ 3958; ДСТУ 4466-10	ДСТУ 3958; ДСТУ 4466-13	ДСТУ 3958; ДСТУ 4466-12	ДСТУ 3958; ДСТУ 4466-14	ДСТУ 3958; ДСТУ 4466-15	
Класи пожеж за ГОСТ 27331 [7] <sup>1)</sup>	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC
Густина газу (насиченої пари) за 101,3 кПа та 20°C, кг/м <sup>3</sup>	1,85	8,05	77,97	31,04	263,0	1,17	1,66	1,41	1,43	
Мінімальна вогнегасна концентрація, % (об.), не більше										
- для гасіння n-гептану	21,0	3,5	9,3	6,9	12,6	33,6	37,5	36,5	31,7	
- для гасіння газу,	н/д	н/д	9,3	6,1	13,2	н/д	н/д	н/д	н/д	
Мінімальна флегматизувальна концентрація, % об., не більше:										
- для сумішей метану і повітря;	25 <sup>2)</sup>		14,7 <sup>2)</sup>	8,0	20,2	39 <sup>2)</sup>		47 <sup>2)</sup>	43	
- для сумішей пропану і повітря	32 <sup>2)</sup>	6,5	9,7 (15,7 <sup>2)</sup> )	11,6	20,2	45 <sup>2)</sup>	55,8		49	
Токсичність, %:										
- NOAEL	5,0	0,2	7,5	9,0	50	43	43	43	43	
- LOAEL		0,4	10,0	10,5	>50	52	52	52	52	

**Примітки.** <sup>1)</sup> Всі ГВР придатні для гасіння електрообладнання, яке знаходиться під напругою електричного струму;  
<sup>2)</sup> Дані [8]

Враховуючи викладене, зроблено висновок щодо доцільності вибору азоту (ГВР IG-100 [11, 12]) в якості флегматизувальної речовини для застосування в складі системи попередження пожежі та вибуху (флегматизування) сухих відсіків ракети носія.

Нормативними документами України [1, 12] передбачено визначення нормативної флегматизувальної концентрації ( $C_{\text{нфк}}$ ) газових вогнегасних речовин на основі значень мінімальної флегматизувальної концентрації ( $C_{\text{мфк}}$ ), отриманих в результаті випробувань за встановленими методиками, з урахуванням коефіцієнту безпеки:

$$C_{\text{нфк}} = 1,1 C_{\text{мфк}} \quad (1)$$

Цими методиками передбачено проведення випробувань за температур від 15 °С до 25 °С. За цих умов проведення випробувань з парами горючих рідин (на відміну від горючих газів) викликають значні складності через низькі значення відповідного парціального тиску  $P_{\text{п}}$ . Наприклад, за температури 21 °С для гасу прямої перегонки  $P_{\text{п}}=0,67$  кПа, а для пропану  $P_{\text{п}} = 129$  кПа. Тому, попереднє визначення необхідної флегматизувальної концентрації азоту для парів пального Jet-A1 було проведено із застосуванням розрахункового методу, викладеного у [13]. Розрахунки виконують у нижченаведеній послідовності.

Мінімальну флегматизувальну концентрацію флегматизатора  $C_{\text{мфк}}$  для горючих речовин, молекули яких складаються з атомів С, Н, О, N, розраховують за формулою

$$C_{\text{мфк}} = C_{\text{гф}} \cdot v_{\text{ф}}, \quad (2)$$

де  $C_{\text{гф}}$  – концентрація пального в екстремальній точці області розповсюдження полум'я (в точці флегматизації), % (об.);

$v_{\text{ф}}$  – число молей флегматизатора, яке приходить на один моль горючого у суміші, яка відповідає за складом точці флегматизації:

$$v_{\text{ф}} = (8,097 m_{\text{C}} + 65,571 m_{\text{H}} + 69,079 m_{\text{O}} - 17,469 m_{\text{N}} + \Delta H_{\text{f}}^{\circ}) / (H'_{\text{ф}} - H^{\circ}_{\text{ф}}), \quad (3)$$

де  $m_{\text{C}}$ ,  $m_{\text{H}}$ ,  $m_{\text{N}}$  – кількість атомів С, Н, О, N у молекулі горючого;

$\Delta H_{\text{f}}^{\circ}$  – стандартна теплота утворення горючої речовини, кДж/моль.

$$C_{\text{гф}} = \frac{100}{1 + 2,42(m_{\text{C}} + 0,5m_{\text{H}} - m_{\text{O}}) + v_{\text{ф}}} \quad (4)$$

Відносна середньо квадратична похибка розрахунку за формулою (4) становить 10%.

З урахуванням запасу надійності гранично допустиму вибухобезпечну концентрацію флегматизатора – ГДВК<sub>ф</sub> розраховують за формулою

$$\text{ГДВК}_{\text{ф}} = k \cdot C_{\text{мфк}} \quad , \quad (5)$$

$$\text{де } k = \begin{cases} 1,2 & \text{при } C_{\text{мфк}} > 15 \% \\ 1,5 & \text{при } C_{\text{мфк}} \leq 15 \% \end{cases}$$

Різницю  $H'_{\text{ф}} - H^{\circ}_{\text{ф}}$  для стабільних в умовах полум'я флегматизаторів розраховують за значеннями абсолютних величин ентальпій флегматизатора за температур 1400 К і 298 К, які виражені у кДж/моль. Для азоту  $H'_{\text{ф}} - H^{\circ}_{\text{ф}} = 34,9$ .

Значення стандартної теплоти утворення  $\Delta H_{\text{f}}^{\circ}$  індивідуальних хімічних речовин наводяться у довідниках, зокрема у [13]. Якщо горюча речовина являє собою суміш

індивідуальних вуглеводнів, як, зокрема, пальне Jet-A1, величину  $\Delta H_f^0$  можливо розрахувати у такій послідовності [14]:

1. Визначають молекулярну масу горючої речовини (суміші)  $M$ ;
2. Вибирають два індивідуальних вуглеводня, близьких за структурою до вуглеводнів суміші; в одного з них молекулярна маса  $M_1$  дещо більша, а у іншого  $M_2$  дещо менша ніж  $M$ ;
3. Користуючись правилом адитивності, знаходять долі вуглеводнів ( $x_1$  та  $x_2$ ), які утворюють суміш з молекулярною масою  $M$ :

$$M = M_1 \cdot x_1 + M_2 \cdot x_2 = \sum M_i \cdot x_i;$$

4. За таким же правилом та знайденими значеннями  $x_i$  визначають термодинамічні величини для «псевдокомпонента», який замінює суміш:

$$\Delta H_f^0 = \sum \Delta H_{fi}^0 \cdot x_i.$$

За описаною процедурою розраховано значення  $\Delta H_f^0$  для пального Jet-A1 з брутто-формулою  $C_{11}H_{21}$ :

1. Молекулярна маса пального становить  
 $M = 12 \cdot 11 + 1 \cdot 21 = 153$ ;
2. Найближчі за молекулярною масою вуглеводні:  
 додекан  $C_{12}H_{26}$  -  $M_1 = 12 \cdot 12 + 1 \cdot 26 = 170$ ;  
 $\Delta H_f^0 = -290,9$  кДж/моль [13];  
 декан  $C_{10}H_{22}$  -  $M_2 = 12 \cdot 10 + 1 \cdot 22 = 142$ ;  
 $\Delta H_f^0 = -249,6$  кДж/моль [13];
3. Долі компонентів  $x_1$  та  $x_2$  у «псевдокомпоненті» з молекулярною масою  $M' = 153$  мають значення  $x_1 = 0,393$ ;  $x_2 = 0,607$ :  
 $M' = 0,393 \cdot 170 + 0,607 \cdot 142 = 153,004$ .
4. Розрахункове значення стандартної теплоти утворення пального:  
 $\Delta H_f^0 = 0,393 \cdot (-290,9) + 0,607 \cdot (-249,6) = -266$  кДж/моль.

Нижче наведено розрахунки за формулами (2) – (5) значень флегматизувальної концентрації азоту для пального Jet-A1, а також для пропану, як загально прийнятої горючої речовини при випробуваннях засобів флегматизування.

Приклад 1 – Розрахунок для пального Jet-A1 ( $C_{11}H_{21}$ ;  $\Delta H_f^0 = -266$  кДж/моль).

Число молей флегматизатора, яке приходить на один моль горючого у суміші, яка відповідає за складом точці флегматизації за формулою (3):

$$v_{\phi} = (8,097 \cdot 11 + 65,571 \cdot 21 - 266) / 34,9 = 34,4.$$

Концентрація пального в екстремальній точці області розповсюдження полум'я (в точці флегматизації) за формулою (4):

$$C_{гф} = \frac{100}{1 + 2,42(11 + 0,5 \cdot 21) + 34,4} = 1,14 \% \text{ об.}$$

Мінімальна флегматизувальна концентрація за формулою (2):

$$C_{мфк} = 1,14 \cdot 34,4 = 39,2 \% \text{ об.}$$

Гранично допустима вибухобезпечна концентрація флегматизатора з урахуванням запасу надійності за формулою (5):

$$ГДВК_{\phi} = 1,2 \cdot 39,2 = 47 \% \text{ об.}$$

Приклад 2 - Розрахунок для суміші повітря і пропану ( $C_3H_8$ ;  $\Delta H_f^\circ = -103,9$  кДж/моль).

$$v_\phi = (8,0973 + 65,5718 - 103,9)/34,9 = 12,75.$$

$$C_{г\phi} = \frac{100}{1 + 2,42(3 + 0,5 \cdot 8) + 12,75} = 3,26 \% \text{ об.}$$

$$C_{м\phiк} = 3,26 \cdot 12,75 = 41,6 \% \text{ об.}$$

$$ГДВК_\phi = 1,2 \cdot 41,6 = 49,9 \% \text{ об.}$$

Різниця між отриманим розрахунковим значенням мінімальної флегматизувальної концентрації  $C_{м\phiк}$  азоту для пропану (41,6 % об.) та даними, наведеними у таблиці 1 та у [13] (45 % об.) становить менше 10%, що відповідає вищенаведеній примітці до формули (4).

Отримані розрахункові значення флегматизувальної концентрації азоту для пального Jet-A1 були взяті за основу під час підготовки та проведення натурних випробувань експериментального зразка системи попередження пожежі та вибуху сухих відсіків ракети-носія.

### Висновки

1. В результаті проведеного аналізу нормативних документів та інформаційних джерел з питань розробки та створення систем протипожежного захисту об'єктів з наявністю замкнених і напівзамкнених технологічних об'ємів з газовими горючими середовищами, а також флегматизування таких середовищ, в якості вогнегасної речовини для системи попередження пожежі та вибуху сухих відсіків ракети-носія вибрано азот.

2. На основі проведених досліджень визначено розрахункові значення флегматизувальної концентрації азоту для пального Jet-A1, які були взяті за основу під час підготовки та проведення натурних випробувань експериментального зразка системи попередження пожежі та вибуху сухих відсіків ракети-носія.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 4466-1:2008 Системи газового пожежогасіння. Проектування, монтаж, випробовування, технічне обслуговування та безпека Частина 1. Загальні Вимоги (ISO 14520-1:2006, MOD) [Текст]. – впр. 2008-09-03.- Київ: Держспоживстандарт України, 2010.– 82 с.
2. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. М.: Недра, 1984. – 151 с.
3. Кулаков В.Г., Копылов С.Н., Барешкин В.В. Применение азотобогащенных газовых смесей, получаемых из атмосферного воздуха, для предотвращения воспламенения различных веществ и материалов в замкнутых объемах // Матер. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы пожарной безопасности». М.: ВНИИПО МЧС России, 2009. С. 126-129
4. В.П.Назаров, А.А.Корнилов Эффективность флегматизации при обеспечении пожаровзрывобезопасности емкостного оборудования. Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности" (<http://ipb.mos.ru/ttb>) Выпуск No 4 (32) – август 2010 [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2010-4/06-04-10.ttb.pdf>
5. Стационарные и передвижные установка пожаротушения инертными газами: Обзорная информация / Быстров Ю.В., Литвинов В.А., Белокопытов О.К., Селезнев И.М. – М.:Объединение «МАШМИР», 1992, вып.1 – 44 с.

6. Серийные мембранные азотные установки МА. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.grasys.ru/products/gas/nitrogen/membrane/serial>
7. ГОСТ 27331-87 Пожарная техника. Классификация пожаров [Текст]. – впр. 1987-06-23.- Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987.– 6 с.
8. Методические рекомендации по порядку осуществления замены озоноразрушающих огнетушащих веществ в установках пожаротушения особо важных объектов. М.: ВНИИПО. – 1998. – 17 с.
9. А.Е.Мешалкин, В.Г.Кулаков, А.Н.Баратов Газосмешение газовых огнетушащих составов в герметичных и негерметичных объемах защиты // Снижение риска гибели людей при пожарах: Матер. XVIII науч.-практ. конф. – Ч.2. – М.: ВНИИПО, 2003. с. 34 - 36
10. Булгаков В.В. Обеспечение пожаровзрывобезопасности огневых аварийно-ремонтных работ на резервуарах способом флегматизации: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: Академия ГПС МЧС России, 2001. – 236 с.
11. ДСТУ 3958:2000 Газові вогнегасні речовини. Номенклатура показників якості, загальні технічні вимоги та методи випробувань [Текст]. – впр. 2000-04-06.- Київ: Держспоживстандарт України, 2000.– 26с.
12. ДСТУ 4466-13:2008 Системи газового пожежогасіння. Проектування, монтаж, випробовування, технічне обслуговування та безпека. Частина 13: Вогнегасна речовина IG-100 (ISO 14520-13:2005, mod) [Текст]. – впр. 2008-09-03.- Київ: Держспоживстандарт України, 2010.– 12с.
13. А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Пожнаука», 2004. – Ч. 1 – 713 с; Ч.2 – 774 с.
14. Гуреев А.А., Жоров Ю.М., Смидович Е.В. Производство высокооктановых бензинов. – Москва: Химия, 1981. - 224 с.

