

*Д.Г. Трегубов, к.т.н., доцент, НУЦЗУ,  
О.В. Тарахно, к.т.н., доцент, нач. каф., НУЦЗУ,  
А.Я. Шаршанов, к.ф.-м.н., доцент, НУЦЗУ*

## **ПРОГНОЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ФЛЕГМАТИЗАЦІЇ ГОРЮЧИХ СИСТЕМ КИСНЕВМІСНИМИ СУМІШАМИ**

(представлено д-ром хім. наук Калугінім В.Д.)

Розглянуто проблему використання для флегматизації горючих систем складами газів, що містять кисень. Розглянуто чотири підходи до розрахунку флегматизуючої концентрації такої технічної суміші за умови її використання для запобігання горіння. Показано ідентичність результатів прогнозу ефективності флегматизації за даними розрахунковими моделями.

**Ключові слова:** флегматизація, азот, кисень, розрахунок.

**Постановка проблеми.** Високою ефективністю гасіння та запобігання пожеж характеризуються вогнегасні засоби, що розбавляють. Тому використання таких засобів в деяких державах займає перше місце. Гальмує більш ширше впровадження цих засобів значні первинні капіталовкладення та досить коштовний сам процес гасіння. Тому на Україні флегматизацію, як правило, використовують для захисту апаратів незначного об'єму.

Флегматизація горючої системи – це перетворення її на негорючу шляхом введення певної кількості розріджувача. Основним ефектом процесу розбавлення є зменшення концентрацій горючої речовини або окисника залежно від того, в яку суміш вводять розріджувач. Додатковим ефектом введення теплових або хімічно-активних розріджувачів є охолодження зони горіння за рахунок теплоємності цих газів.

На практиці виникає потреба використання розріджувачів, що містять залишковий кисень. Це можуть бути і продукти горіння з залишковим киснем, і неповністю розподілене на складові повітря. Виявляється, що дешевше використовувати флегматизатор, який містить певний вміст кисню, ніж чистий негорючий газ без домішок окисника. При виготовленні таких сумішей знижуються вимоги до ступеню очистки від залишків кисню з неї. Так, чистий азот з вмістом основної речовини 99,9 % отримують за криогенної технології, такий азот має велику собівартість. Дешевше, за умови можливості досягнення заданої глибини розділу повітря, працюють адсорбційні та мембранні технології.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В якості прикладу крупномасштабного використання флегматизації на виробництві мож-

на назвати «сухе гасіння» металургійного коксу. Приблизний склад циркулюючого охолоджуючого газу наступний:  $\text{CO}_2$  – 5 %,  $\text{CO}$  – 18 %,  $\text{H}_2$  – 10 %,  $\text{O}_2$  – 0,4 %,  $\text{N}_2$  – 66,6 %. У цій атмосфері не відбувається окиснення твердого вуглецевого залишку процесу коксування, а температура продукту зменшується. При остиганні коксу до критичної температури він вже не реагує з киснем повітря.

Суміші на основі негорючих газів, які містять певний вміст кисню та горючих компонентів, потребують збільшення їх подачі для досягнення умови флегматизації. Тобто флегматизуюча концентрація для запобігання горіння (в тому числі – гетерогенного горіння розжареного коксу) внаслідок використання технічних сумішей зростає.

Базовий підхід до вирішення задачі прогнозування ефективності флегматизації горючих систем сумішами на основі негорючих газів з вмістом кисню викладено у роботі [2], у якій цю задачу вирішено відносно вмісту у суміші негорючого газу.

**Постановка завдання та його вирішення.** Метою даного дослідження є пошук шляхів прогнозування ефективності флегматизації горючих систем сумішами на основі негорючих газів з вмістом кисню з використанням інших підходів відносно досліджених. Це дозволить розв'язувати практичні задачі за різних вихідних даних, в також поглибить розуміння процесу флегматизації газового середовища технічними сумішами негорючих газів.

Порівняльну оцінку прогнозу ефективності флегматизації чистим та технічним азотом за різними підходами проведено на прикладі горючої системи « $\text{C}_4\text{H}_9\text{ON}$  (морфолін) 3,3 % та  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  (етанол) 96,7 %». Усереднена хімічна формула заданої суміші становить –  $\text{C}_{2,07}\text{H}_{6,07}\text{ON}_{0,033}$ . Розрахункова флегматизуюча концентрація за методикою викладеною у нормативних документах [1] для такої суміші при використанні чистого азоту становить 45,4 % (за інкрементами вкладу атомів горючих речовин), а мінімальний вибухонебезпечний вміст кисню – 11,29 %.

Для прогнозу ефективності флегматизації даної суміші «морфолін + етанол» технічним азотом, що містить 4 % кисню розглянуто додатково три розрахункових напрямки.

1. За механізмом розбавлення повітряного простору негорючим газом, що містить кисень.

2. За механізмом досягнення у повітряному просторі мінімального вибухонебезпечного вмісту кисню при подачі технічної суміші.

3. За вмістом кисню у суміші, виходячи з матеріального балансу на критичній межі підтримання горіння в процесі флегматизації.

4. За вмістом негорючого газу у суміші, виходячи з матеріального балансу на критичній межі підтримання горіння в процесі флегматизації.

Напрямок 1. Оскільки технічна суміш має нестачу у своєму складі негорючого газу (у даному випадку азоту), то при подачі такої суміші у флегматизуючій концентрації утвориться лише певна частка від неї, відповідно до вмісту негорючого газу у суміші. Тобто, необхідно подати дещо більше суміші, щоб утворити 100 % від флегматизуючої концентрації

$$\varphi_{\text{фл}_{\varphi_{\text{нг}}}} = 100 \frac{\varphi_{\text{фл}}}{\varphi_{\text{нг}}}, \% \quad (1)$$

де  $\varphi_{\text{фл}_{\varphi_{\text{нг}}}}$  – флегматизуюча концентрація, перерахована на фактичний вміст негорючого газу у технічній суміші  $\varphi_{\text{нг}}$ , %;  $\varphi_{\text{фл}}$  – флегматизуюча концентрація для даного негорючого газу, %;  $\varphi_{\text{нг}}$  – фактична концентрація негорючого газу у технічній суміші, %.

Отримане за формулою (1) значення флегматизуючої концентрації (для випадку, що розраховується, дорівнює 47,24 %, не враховує збагачення повітряного простору киснем, який міститься у флегматизуючій суміші. Для флегматизації цього додаткового кисню необхідна додаткова подача флегматизуючої суміші. Ця додаткова технічна суміш теж містить кисень, який необхідно зафлегматизувати. Максимальна кількість кисню, що додатково надходить, за умови повного заповнення об'єму, який захищається, дорівнює вмісту кисню у негорючій суміші. Для випадку, що розраховується, це 4 %. Для розбавлення 1 %

кисню у складі повітря необхідно подати  $\Delta\varphi_{\text{фл}_{\text{O}_2}}^{1\%} = \frac{\varphi_{\text{фл}_{\varphi_{\text{нг}}}}}{21}$  даної флегматизуючої суміші (за поточним розрахунком отримаємо 2,25 %). Або на повну кількість додаткового кисню

$$\Delta\varphi_{\text{фл}_{\text{O}_2}} = \frac{\varphi_{\text{фл}_{\varphi_{\text{нг}}}}}{21} \cdot \varphi_{\text{O}_2}, \% \quad (2)$$

де  $\Delta\varphi_{\text{фл}_{\text{O}_2}}$  – додаткова флегматизуюча концентрація для компенсації надходження кисню разом із технічною сумішшю, %;  $\varphi_{\text{O}_2}$  – фактична концентрація кисню у складі флегматизуючої суміші, %.

За поточним розрахунком для флегматизації 4 % кисню технічної суміші витрату подачі цієї суміші необхідно збільшити на 9 %.

Таким чином, максимальна концентрація негорючої суміші для флегматизації повітряного простору становить

$$\varphi_{\text{фл}_{\text{сум}}} = \varphi_{\text{фл}_{\text{фнг}}} + \frac{\varphi_{\text{фл}_{\text{фнг}}}}{21} \cdot \varphi_{\text{O}_2}, \% \quad (3)$$

де  $\varphi_{\text{фл}_{\text{сум}}}$  – повна флегматизуюча концентрація для даного кисневмісного розріджувача, %.

З врахуванням (1) загальна формула перерахунку флегматизуючої концентрації чистого негорючого газу на вміст у ньому кисню набуває вигляду

$$\varphi_{\text{фл}_{\text{сум}}} = 100 \frac{\varphi_{\text{фл}}}{\varphi_{\text{фнг}}} \left( 1 + \frac{\varphi_{\text{O}_2}}{21} \right) = 4,76 \frac{\varphi_{\text{фл}}}{\varphi_{\text{фнг}}} (21 + \varphi_{\text{O}_2}), \% \quad (4)$$

Отже, якщо розріджувач містить кисень, це збільшує потребу у подачі флегматизатора пропорційно зменшенню вмісту негорючого газу та збільшенню вмісту кисню у технічній суміші.

За формулою (4) для випадку, що розраховується (запобігання горіння суміші «етанол+морфолін» флегматизатором складу  $\text{N}_2$  – 96 % та  $\text{O}_2$  – 4 %), отримано значення флегматизуючої концентрації 56,2 %.

Напрямок 2. В попередньому розрахунку визначена флегматизуюча концентрація технічної суміші, вміст у якій негорючого газу менший за 100 %, див. формулу (1). Ця суміш містить флегматизуючу концентрацію негорючого газу для повітря та супутній кисень (для випадку, що розглядається, це 45,35 % та 1,89 %). Подача кисневмісної технічної суміші все ж таки зменшує концентрацію кисню у повітрі на  $\Delta\varphi_{\text{O}_2}$  до мінімального вибухонебезпечного вмісту. Тоді можна визначити необхідну кількість технічної суміші для флегматизації кисню, що міститься у її складі

$$\Delta\varphi_{\text{фл}_{\text{O}_2}} = \frac{\varphi_{\text{фл}_{\text{фнг}}}}{21 - \varphi_{\text{МВВК}}} \cdot \varphi_{\text{O}_2_{\text{доп}}} = \frac{\varphi_{\text{фл}_{\text{фнг}}}}{\Delta\varphi_{\text{O}_2}} \cdot \varphi_{\text{O}_2_{\text{доп}}}, \quad (5)$$

де  $\varphi_{\text{O}_2_{\text{доп}}}$  – фактична концентрація додаткового кисню у повітрі за умови подачі флегматизуючої, %,  $\Delta\varphi_{\text{фл}_{\text{O}_2}} = \varphi_{\text{фл}_{\text{фнг}}} - \varphi_{\text{фл}}$ ;  $\varphi_{\text{МВВК}}$  – мінімальний вибухонебезпечний вміст кисню, %;  $\Delta\varphi_{\text{O}_2}$  – необхідне зменшення концентрації кисню у повітрі для досягнення мінімального вибухонебезпечного вмісту, %.

Флегматизуючу концентрацію для технічної суміші можна визначити, як суму флегматизуючої концентрації розрідженим негорючим газом та додаткової кількості технічної суміші

$$\varphi_{\text{фл}_{\text{сум}}} = \varphi_{\text{фл}_{\text{фнг}}} + \frac{\varphi_{\text{фл}_{\text{фнг}}}}{21 - \varphi_{\text{МВВК}}} \cdot \varphi_{\text{O}_2_{\text{доп}}}, \quad \% \quad (6a)$$

$$\text{або} \quad \varphi_{\text{фл}_{\text{сум}}} = 100 \frac{\varphi_{\text{фл}}}{\varphi_{\text{фнг}}} \left( \frac{\Delta\varphi_{\text{O}_2} + \varphi_{\text{O}_2_{\text{доп}}}}{\Delta\varphi_{\text{O}_2}} \right), \quad \% \quad (6b)$$

Отже, якщо розріджувач містить кисень, це збільшує потребу у подачі такого флегматизатора пропорційно зменшенню вмісту негорючого газу та збільшенню у ній вмісту кисню.

За формулою (6) для випадку, що розраховується (запобігання горіння суміші «етанол+морфолін» флегматизатором складу  $\text{N}_2 - 96\%$  та  $\text{O}_2 - 4\%$ ), отримано значення флегматизуючої концентрації  $56,4\%$ .

Напрямок 3. Приймаємо, що суміш повітря та негорючого газу на межі флегматизації складає  $100\%$  системи, що розглядається, а негорючий газ при цьому містить кисень

$$r_{\text{п}}(0,79 + 0,21) + r_{\text{фл}}((1 - \alpha_{\text{O}_2}) + \alpha_{\text{O}_2}) = 1, \quad (7)$$

де  $r_{\text{п}} = (1 - r_{\text{фл}})$  – об’ємна частка повітря у складі розріджувача за умови його подачі в об’єм, який необхідно захистити;  $r_{\text{фл}}$  – об’ємна частка розріджувача для флегматизації даної горючої речовини;  $0,79, 0,21$  – об’ємні частки у повітрі азоту та кисню;  $(1 - \alpha_{\text{O}_2})$  – об’ємна частка негорючого газу у технічній суміші;  $\alpha_{\text{O}_2}$  – об’ємна частка кисню у технічній суміші.

Формулу (7) можна представити з точки зору вмісту у загальній суміші кисню та негорючих газів

$$r_{\text{O}_2} + r_{\text{N}_2} = (r_{\text{п}} \cdot 0,21 + r_{\text{фл}} \alpha_{\text{O}_2}) + (r_{\text{п}} \cdot 0,21 + r_{\text{фл}}(1 - \alpha_{\text{O}_2})) = 1, \quad (8)$$

де  $r_{\text{O}_2}$  – об’ємна частка кисню на нижній концентраційній межі поширення полум’я у разі створення умови флегматизації;  $r_{\text{N}_2}$  – об’ємна частка негорючого газу на нижній концентраційній межі поширення полум’я у разі створення умови флегматизації.

На нижній концентраційній межі поширення полум’я даної го-

рючої речовини у разі створення умови флегматизації існує фіксоване співвідношення між вмістом у суміші кисню та негорючих газів

$$K = \frac{r_{O_2}}{r_{N_2}} = \frac{r_{п} \cdot 0,21 + r_{фл} \alpha_{O_2}}{r_{п} \cdot 0,21 + r_{фл} (1 - \alpha_{O_2})}. \quad (9)$$

Підставляючи  $r_{п} = (1 - r_{фл})$  у вираз (9) і вирішуючи його відносно  $r_{фл}$ , отримаємо вираз в якому фігурує необхідна флегматизуюча частка негорючого газу у разі відсутності у технічній суміші кисню

$$r_{фл} = \frac{0,21 - K \cdot 0,79}{(0,21 - \alpha_{O_2})(K + 1)} = \frac{0,21}{0,21 - \alpha_{O_2}} \cdot \frac{0,21 - K \cdot 0,79}{0,21(K + 1)}. \quad (10)$$

Таким чином, формула розрахунку умови флегматизації технічною сумішшю набуває вигляду

$$r_{фл} = \frac{0,21}{0,21 - \alpha_{O_2}} \cdot r_{фл\alpha_{O_2}=0} \quad (11a)$$

або

$$\varphi_{фл} = \frac{0,21}{0,21 - \alpha_{O_2}} \cdot \varphi_{фл\alpha_{O_2}=0}, \quad \% \quad (11b)$$

де  $r_{флO_2} = \frac{0,21 - K \cdot 0,79}{0,21(K + 1)}$  – об'ємна частка негорючого газу, що відповідає флегматизуючій концентрації, за умови, що кисень у технічній суміші відсутній,  $\alpha_{O_2} = 0$ , %;  $\varphi_{фл}$  – флегматизуюча концентрація технічної суміші, що містить кисень, %;  $\varphi_{фл\alpha_{O_2}=0}$  – флегматизуюча концентрація негорючого газу без вмісту домішок, %.

Отже, якщо технічна суміш містить кисень, це збільшує потребу у її подачі на частку пропорційну вмісту кисню.

За формулою (11) для випадку, що розраховується, отримано значення флегматизуючої концентрації 56,02 %.

Напрямок «4» реалізовано у роботі [2], попередню задачу вирішено відносно вмісту у суміші негорючого газу

$$\varphi_{фл} = \frac{100 - 79}{\varphi_{нг} - 79} \cdot \varphi_{фл\alpha_{O_2}=0} = \frac{21}{\varphi_{нг} - 79} \cdot \varphi_{фл\alpha_{O_2}=0}, \quad \% \quad (12)$$

де 21 та 79 – вміст у повітрі кисню та азоту, %.

Отже, якщо технічна суміш містить кисень, це збільшує потребу у її подачі на частку пропорційну нестачі негорючого газу до 100 % у цій суміші.

За формулою (12) для випадку, що розраховується, отримано значення флегматизуючої концентрації 56,02 % [2].

**Висновок.** Отримано три альтернативних формули (4), (6) та (11) для розрахунку флегматизуючої концентрації технічною сумішшю, що містить кисень. Прогноз флегматизуючої концентрації за даними формулами збігається з прогнозом за формулою (12).

Наявність кисню у складі технічної суміші збільшує потребу у її подачі на частку пропорційну нестачі негорючого газу або вмісту кисню у її складі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М: Издательство стандартов. – 1989. – 100 с.

2. Откідач Д.М. Флегматизація горючих газових середовищ / Д.М. Откідач, Ю.В. Цапко, К.І. Соколенко. – К: Пожінформ техніка. – 2005. – 196 с.

Д.Г. Трегубов, Е.В. Тарахно, А.Я. Шаршанов

**Прогноз ефективності флегматизації горючих систем кислородо-держачими смесями**

Рассмотрена проблема использования для флегматизации горючих систем составами газов, содержащих кислород. Рассмотрены четыре подхода к расчету флегматизирующей концентрации такой технической смеси при условии его использования для предотвращения горения. Показано идентичность результатов прогноза эффективности флегматизации по данным расчетным моделям.

**Ключевые слова:** флегматизация, азот, кислород, расчет.

D.G. Tregubov, O.V. Tarahno, A.Ya. Sharshanov

**Forecast efficiency phlegmatizing combustible systems by oxygen-containing mixes**

The problem of using for phlegmatization systems of gases containing oxygen is combustible. We consider four approaches to the calculation phlegmatization concentration of such technical mixtures provided its use to prevent burning. The identity of the results of future operating performance desensitization according to computational models is shown.

**Keywords:** phlegmatization, nitrogen, oxygen, calculation.