

ЗАХОДИ ІЗ ЗАПОБІГАННЯ ВИБУХОПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕКИ У НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ

**Я. М. Семчук , Г. М. Кривенко , Г. М. Грицуляк ,
О. В. Кривенко **

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +38(0342)72-71-58; e-mail: bzhd@nung.edu.ua*

Однією з головних небезпек нафтогазової галузі є достатньо високий рівень ризику виникнення вибухів та пожеж, спричинених присутністю у процесах видобування, транспортування та зберігання значних мас вуглеводнів, які за певних умов можуть створювати вибухопожежонебезпечні концентрації горючих газів чи парів. Запобігання виникнення таких умов в правилах безпеки передбачена ціла низка проектно-планувальних норм і засобів технічного, технологічного та організаційного характеру. Вентиляція вибухопожежонебезпечних приміщень відіграє важливу роль у запобіганні виникнення небезпечних ситуацій. Одним з важливих призначень вентиляції є недопущення утворення вибухонебезпечних концентрацій горючих газів, парів чи пилу. Отже, запобігання вибухопожежонебезпечки у нафтогазовій галузі є актуальним. Метою роботи є уточнення методики визначення показників, що регламентують вибухопожежонебезпечку на об'єктах паливно-енергетичного комплексу. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: обґрунтування визначення показників, що регламентують вибухопожежонебезпечку на нафтогазових об'єктах та заходи з запобігання вибухопожежонебезпечки.

У зв'язку з певними термінологічними та змістовними змінами, що відбулися на етапі формування нормативно-правової бази охорони праці протягом останніх десятиліть, визначення показників нижньої концентраційної межі вибуховості та нижньої концентраційної межі поширення полум'я, що регламентують вибухопожежонебезпечку, потребує уточнення. Заходи профілактики вибухопожежонебезпечки у межах робочих зон, що не мають просторового обмеження, ґрунтуються переважним чином на контролі загазованості повітря з метою своєчасного виявлення небезпечних концентрацій та недопущенні присутності у небезпечних зонах джерел займання (спалахування) газоповітряних сумішей (принципи «концентрації та локалізації»). Наведено заходи профілактики вибухопожежонебезпечки в межах робочих зон, що не мають просторового обмеження, та уточнену методику визначення показників, що регламентують вибухопожежонебезпечку на об'єктах паливно-енергетичного комплексу.

Ключові слова: *Витяжна аварійна вентиляція, концентрація, ймовірність неспалахування суміші, ступінь неоднорідності суміші, вибухонебезпечна ситуація.*

Вступ. Однією з ключових загроз у нафтогазовій галузі є підвищений ризик виникнення вибухів і пожеж, що зумовлений наявністю значних обсягів вуглеводнів у процесах їх видобування, транспортування та зберігання. За певних умов такі речовини можуть формувати вибухопожежонебезпечні концентрації горючих газів або парів у повітрі. З метою недопущення подібних ситуацій чинними нормативами та правилами безпеки передбачено комплекс проектно-планувальних, технічних, технологічних та організаційних заходів.

Особливе значення у системі протиаварійного захисту має вентиляція вибухонебезпечних приміщень, оскільки її функцією є запобігання накопиченню вибухонебезпечних концентрацій горючих газів, парів або пилу. Така вентиляція відноситься до аварійної.

Згідно з чинними будівельними нормами та правилами безпеки [1-3], насосні та компресорні станції магістральних нафтогазопроводів і нафтопродуктопроводів, газокompресорні станції та дотискні компресорні станції систем збору нафти і газу повинні бути оснащені, окрім технологічного обладнання, такими системами:

- примусовою припливно-витяжною та аварійною вентиляцією;
- системою автоматичного газо-пароконтролю, інтегрованою з автоматичним запуском аварійної вентиляції;
- системою автоматичного пожежогасіння та первинними засобами пожежогасіння;
- світловою та звуковою сигналізацією аварійних ситуацій;
- аварійним освітленням тощо.

Аварійна витяжна вентиляція повинна автоматично вмикатися при досягненні небезпечних концентрацій горючих газів або парів у повітрі: 10% нижньої концентраційної межі вибуховості (НКМВ) для газових об'єктів та 20% нижньої концентраційної межі поширення полум'я (НКМПП) для нафтових об'єктів. Крім того, робота компресорного цеху, газоперекачувальних агрегатів (ГПА) в окремих укриттях та інших вибухонебезпечних приміщеннях підлягає аварійній зупинці, якщо концентрація горючих газів перевищує 20% НКМВ. Для насосних станцій цей показник становить 30% НКМПП.

Отже, забезпечення попередження вибухопожежонебезпеки на об'єктах нафтогазового комплексу є вкрай актуальним завданням сучасної системи безпеки виробництва.

Аналіз попередніх досліджень. Проблеми запобігання вибухопожежонебезпеки об'єктів паливно-енергетичного комплексу присвячено наукові роботи Говдяка Р. М. Розгонюка В.В., Лисяного Г. М., та ін. [4, 5, 6]. Ризик виникнення вибухів та пожеж наведено у [7, 8, 9]. Слід від-

мітити, що у наведених роботах недостатньо висвітленні питання запобігання вибухопожежонебезпеки, які стосуються охорони праці на об'єктах паливно-енергетичного комплексу. На жаль у сучасних навчальних посібниках з охорони праці ці питання також не знайшли належного тлумачення і тому, на наш погляд, буде доцільним внести відповідні пояснення та доповнення.

Метою роботи є уточнення методики визначення показників, що регламентують вибухопожежонебезпеку на об'єктах паливно-енергетичного комплексу. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: обґрунтування визначення показників, що регламентують вибухопожежонебезпеку на нафтогазових об'єктах та заходи із запобігання вибухопожежонебезпеки.

Виклад основного матеріалу. З огляду на термінологічні та концептуальні зміни, що відбулися під час формування сучасної нормативно-правової бази у сфері охорони праці за останні десятиліття, виникає потреба окремо розглянути актуальні визначення показників НКМВ та НКМПП, які регламентують рівень вибухопожежної небезпеки.

Актуальні трактування цих термінів відповідно до чинних нормативних документів подаються у такому вигляді:

– НКМПП – нижня концентраційна межа поширення полум'я – мінімальна концентрація горючої речовини в однорідній суміші з окиснювальним середовищем, при якій можливе самостійне поширення полум'я на будь-яку відстань від джерела запалювання.

– НКМВ – нижня концентраційна межа вибуховості (спалахування) – мінімальна концентрація горючих або вибухонебезпечних речовин у повітрі, за якої суміш може спалахнути або вибухнути під впливом джерела запалювання, % об.

Зазвичай значення НКМПП встановлюється експериментально за стандартних умов. Існують також розрахункові підходи, однак перевага надається експериментальним методам, оскільки вони забезпечують вищу достовірність результатів.

Слід враховувати, що величина НКМПП залежить від температури (t). Ця залежність має наступний вигляд [6]:

$$\varphi_{n,t} = \varphi_n (1,02 - 0,00079t), \quad (1)$$

де φ_n – НКМПП при P_{am} і $t_0 = 25^\circ \text{C}$, %.

Окрім того, за реальних умов, у зв'язку з можливим існуванням неоднорідності розподілу горючої речовини у певному обсязі, виникають умови для локального спалахування окремих ділянок суміші, в яких концентрація горючої речовини уже знаходиться в межах діапазону вибуху (концентрація в межах від нижньої до верхньої межі поширення полум'я).

Така ситуація являє потенційну небезпеку виникнення локальної пожежі (вибуху) тощо. Тому виникає потреба у введенні додаткових гарантій безпеки.

Ймовірність виникнення запалювання чи вибуху газоповітряної суміші також залежить від ймовірності присутності джерела запалювання.

Власне цими обставинами і пояснюється необхідність застосування показників НКМВ і НКМПП.

Відповідно до [6] вибуховобезпечною концентрацією горючого газу (пари, пилю) у повітрі вважається концентрація (в % об), яка задовольняє наступній умові:

$$\varphi_z \leq \varphi_n / K_n, \quad (2)$$

де φ_n – вміст горючої речовини у безпечній суміші, що не спалахує, або НКМВ; K_n – коефіцієнт безпечності експериментальних значень параметрів пожежної безпеки φ , який розраховується за формулою:

$$K_n = K_{\Pi} \cdot K_c \cdot \varphi_{cp} / (\varphi_{cp} - \alpha \cdot S), \quad (3)$$

де K_{Π} – коефіцієнт, що враховує похибку методу визначення параметра φ , $K_{\Pi} = 1,1$; K_c – ступінь неоднорідності суміші (для однорідних сумішей $K_c = 1$, для неоднорідних $K_c = 1, \dots, 5$); φ_{cp} – середньоарифметичне значення для різних проб сумішей; S – оцінка середньоквадратичного відхилення окремого результату визначення параметра φ_i від середньоарифметичного φ_{cp} :

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot (\varphi_i - \varphi_{cp})^2}, \quad (4)$$

де n – число визначень параметра φ ; α – коефіцієнт запасу, величина якого залежить від ймовірності утворення суміші індивідуальної горючої речовини з окиснювачем, що не спалахує (для $P_{см} = 0,999$ – $\alpha = 3,34$, а для $P_{см} = 0,999999$ – $\alpha = 4,96$).

Ймовірність неспалахування суміші пропонується розрахувати за формулою:

$$P_{см} = 1 - \frac{1 - P_{без}}{1 - P_{факт}}, \quad (5)$$

де $P_{без}$ – нормативний рівень пожежної безпеки, який приймається рівним 0,999999 при відсутності економічних обґрунтувань для окремого технологічного вузла; $P_{факт}$ – фактична ймовірність відсутності у досліджуваному середовищі джерела запалювання (при відсутності експериментальних даних величину $P_{факт}$ приймають рівною 0,999, а для середовища, в якому можлива поява випадкових джерел запалювання, $P_{факт} = 0$).

Тому, враховуючи важливість і потенційну небезпеку об'єктів підвищеної небезпеки, які пов'язані з процесами видобування, транспортування та зберігання вуглеводнів при розрахунках НКМВ, як правило, фізично неоднорідних горючих сумішей коефіцієнти безпеки помножують на 5.

Заходи профілактики вибухопожежонебезпеки в межах робочих зон, що не мають просторового обмеження, ґрунтуються переважним чином на контролі загазованості повітря з метою своєчасного виявлення небезпечних концентрацій та недопущенні присутності в небезпечних зонах джерел займання (спалахування) газоповітряних сумішей (принципи «концентрації та локалізації»).

Так, автомобілі, спецтехніку і засоби радіозв'язку необхідно розташовувати з навітряної сторони відносно можливого місця виділення (появи) небезпечних газів чи парів на відстані не ближче 30м від місця розлиті нафти чи конденсату і не ближче 25 м від гирла нафтової чи газової свердловини.

Крім того автомобілі і спецтехніку слід розміщати з урахуванням можливості швидкого і безпечного маневрування (моторними частинами в протилежний бік від небезпечної зони тощо).

Особливу небезпеку для довкілля створюють автоцистерни у випадку виникнення аварійної ситуації, обумовлені наявністю усередині технологічного середовища, що характеризується більше вибухопожежонебезпечними властивостями, ніж токсичними [7]. Слід відмітити, що технологічні операції з скрапленими вуглеводневими газами є небезпечними, тому що є висока ймовірність виникнення вибухів та пожеж що призводять до забруднення навколишнього середовища, травм та загибелі людей, завдають значних матеріальних збитків, негативно впливають на здоров'я населення.

Визначено ймовірність нанесення збитків довкіллю та травмування людей повітряною хвилею за допомогою пробіт-функцій.

За розрахованими величинами пробіт-функції визначено ймовірність ураження. Ймовірність пошкоджень промислових будівель складає 90 %, руйнувань промислових будівель – 28 %, розриву барабанних перетинок у людей – 2,5 %. Ймовірності інших критеріїв ураження близькі до нуля [7].

Технічні засоби, що безпосередньо не беруть участі у аварійних роботах, повинні розташовуватись не ближче, ніж за 100м від зони розливу нафти, або за межами газонебезпечної зони.

Пуск чи зупинка насосного та іншого обладнання з електроприводом в межах зони загазованості слід виконувати дистанційно, а усе електрообладнання і світильники повинні бути в вибухозахищеному виконанні. Під час грози в районі компресорних станцій не дозволяється пуск та зупинка ГПА, переключення на силовому електроустаткуванні та в технологічній обв'язці, які можуть призвести до залпового викиду газу в атмосферу (продувка запобіжних клапанів, свічок тощо).

Для гарантування безпечної експлуатації трубопровідного транспорту необхідно дотримуватися певних заходів, а саме: нормативно-правове регулювання безпеки; безперервне підвищення технічного рівня експлуатації; розвиток засобів автоматизації та телемеханізації; розвиток системи діагностування технічного стану та методів оцінки і про-

гнозування залишкового ресурсу трубопроводів та обладнання; удосконалення технології та організації поточних та капітальних ремонтів трубопроводів та обладнання тощо. Слід звернути увагу, що при відмові газопроводів ударна хвиля є одним з чинників, що уражають. Вона утворюється внаслідок розповсюдження в атмосфері природного газу, який під тиском «вирвався» із зруйнованого газопроводу, а також стиснених хвиль, які утворюються під час загоряння газового шлейфа з розповсюдженням продуктів згоряння.

Маючи великий запас енергії, ударна хвиля може уражати незахищених людей, руйнувати різні споруди, будівлі, обладнання і техніку. Із збільшенням відстані від епіцентру вибуху швидкість розповсюдження ударної повторної хвилі та ударний тиск зменшуються.

Безпечна відстань ($\Gamma_{\text{г}}$) від впливу ударної хвилі під час викидів газу з трубопроводу, що супроводжується спалахуванням, визначається за відомою формулою [11]:

$$\Gamma_{\text{г}} = K_{\text{г}} \cdot \sqrt[3]{W_{\text{т}}}, \quad (6)$$

де $W_{\text{т}}$ – тротильовий еквівалент, т; $K_{\text{г}}$ – коефіцієнт пропорційності, $\text{м/т}^{1/3}$, величина якого залежить від характеру пошкодження навколишніх об'єктів.

Загоряння газу відбувається безпосередньо на місці пошкодження приблизно у половині випадків аварійного руйнування магістральних газопроводів. Основними чинниками, від яких залежить характер горіння газу і масштаби впливу на довкілля, є робочий тиск і діаметр трубопроводу, густина ґрунту тощо.

За методикою, наведеною у [10], визначено характер зміни тиску від центра вибуху в залежності від діаметра трубопроводу d , часу t та віддалі від центра вибуху a . Результати розрахунків наведено на рис. 1.

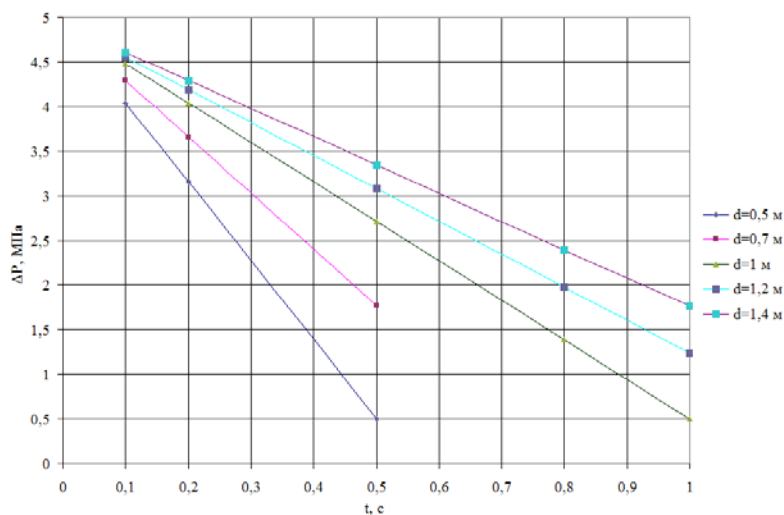


Рис. 1. Залежність зміни тиску від часу для різних діаметрів трубопроводу при $a = 0,9$ м

Із аналізу рис. 1 випливає, що з віддаленням від епіцентру вибуху 0,9 м із збільшенням діаметра трубопроводу від 0,5 м до 1,4 м зміна тиску ударної хвилі внаслідок розриву труби найменшого досліджуваного діаметра на 0,5 секунді становить 0,5 МПа, а при розриві труб найбільшого діаметра – 3,4 МПа, а за секунду після вибуху на тій же віддалі надлишкові тиски у вибуховій хвилі виникають лише при діаметрах трубопроводу 1 м і більше.

Для гарантування безпеки експлуатації обладнання корпуси насосів, що перекачують конденсат чи інші легкозаймисті нафтопродукти повинні бути заземлені незалежно від наявності заземлення двигунів, що знаходяться на одній рамі з насосами, для упередження появи на їх поверхні небезпечних потенціалів статичної електрики. Під час зливання або наповнення газоконденсату чи інших легкозаймистих рідин, при використанні автоцистерни двигун автомобіля повинен бути заглушений, а корпус цистерни, рукав для конденсату чи нафтопродукту і його металевий наконечник повинні бути заземлені. Наконечник рукава повинен бути опущений до дна цистерни на відстань не більше 200 мм.

Вищезгадані проблеми є актуальними не тільки для газових об'єктів, а також при застосуванні різноманітних методів підвищення нафтовилучення.

Особливої ваги вони набувають при застосуванні термічних методів впливу на продуктивні пласти під час освоєння та експлуатації свердловин.

При цих процесах можуть створюватись сприятливі умови для виникнення джерел запалювання за рахунок високих тисків та температур, накопичення високих потенціалів статичної електрики, утворення та самозаймання пірофорних сполук тощо.

Тому для упередження виникнення вибухонебезпечних ситуацій необхідно регламентувати та контролювати параметри газоповітряних сумішей з урахуванням тиску, температури, компонентного складу та умов об'єктів.

Із термічних методів впливу на пласт найбільш небезпечним є метод внутрішньо пластового горіння (ВГ). Вибухонебезпечність об'єктів ВГ повинна будуватись, переважно на обмеженні вмісту кисню або горючого газу у газоповітряній суміші, виходячи з умов її формування на конкретному об'єкті. Тому у нагнітальних свердловинах повинна регламентуватись та контролюватись концентрація горючого газу у газоповітряній суміші з врахуванням можливості попадання газу із пласта при зменшенні тиску повітря, що закачується у свердловину.

У видобувних свердловинах вибухонебезпечна концентрація газоповітряної суміші може утворитися головним чином за рахунок припливу надлишку окислювача (кисню) з пласта в свердловину, що можливе при згасанні горіння в пласті, наявності в ньому тріщин тощо. Тому і у видобувних свердловинах необхідно регламентувати та контролювати

лювати вміст кисню у газовій суміші. Остання вимога стосується також і об'єктів збору продукції свердловин.

Гранично допустима вибухова концентрація кисню у газоповітряній суміші визначається за формулою [6]:

$$ГДВ_{\kappa_{O_2}} = \frac{(100 - \varphi_B) \cdot 0,21}{K_{\delta}}, \quad (7)$$

а гранично допустима концентрація газу:

$$ГДВ_{\kappa_r} = \frac{\varphi_H}{K_{\delta}}, \quad (8)$$

де φ_B та φ_H – відповідно верхня та нижня межі поширення полум'я газоповітряної суміші, % об; K_{δ} – коефіцієнт, що враховує зміну середньої вибухової концентрації вуглеводневих енергоносіїв у газоповітряній суміші залежно від тиску, температури та компонентного складу продукції видобувних нафтогазових свердловин.

Формула (7) застосовується виключно для газових і парових горючих сумішей, для яких експериментально визначені нижня та верхня концентраційні межі поширення полум'я.

У відповідності до рекомендацій [6] при $\varphi_H \leq 0,5\varphi_i$, $K_{\delta} = 1,5$, де φ_i – стехіометрична концентрація горючої суміші в повітрі, % об.

Отже, під час експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки, які пов'язані з процесами видобування, транспортування та зберігання вуглеводнів, необхідно контролювати загазованість повітря.

Висновки

Наведено уточнену методику визначення показників, які регламентують вибухопожежонебезпеку на об'єктах паливно-енергетичного комплексу, з урахуванням неоднорідності суміші, похибки експериментальних методів та ймовірності наявності джерела запалювання, що дасть змогу виявляти небезпечні концентрації загазованості повітря.

Визначено ймовірність нанесення збитків довкіллю та травмування людей повітряною хвилюю за допомогою пробіт-функції.

Для попередження виникнення вибухопожежонебезпеки на нафтогазових об'єктах пропонуються такі заходи: контроль за критичними параметрами безпеки при видобуванні, транспортуванні та зберіганні вуглеводневих енергоносіїв; розміщення техніки, заземлення обладнання, дистанційне керування та обмеження дій під час грози.

Наведені результати досліджень можуть використовуватися під час вирішення питань безпечної експлуатації об'єктів нафтогазового комплексу.

Література

1. НПАОП 60.3-1.01-10. Правила безпечної експлуатації магістральних газопроводів.
2. НПАОП 0.00-1.21-07. Правила безпеки під час експлуатації магістральних нафтопроводів.

3. НПАОП 11.1-1.16-23. Правила безпеки в нафтогазовидобувній промисловості.
4. Енергоекологічна безпека нафтогазових об'єктів / Р. М. Говдяк та ін. Івано-Франківськ: «Лілея НВ», 2007. 556 с.
5. Говдяк Р. М., Коснирєв Н. М. Кількісний аналіз аварійного ризику газотранспортних об'єктів підвищеної небезпеки. Львів: 2007. 158 с.
6. Охорона праці в нафтогазовій галузі / за ред. професора МНТУ Г.М. Лисяного. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2015. 304 с.
7. Чернова О. Т., Кривенко Г. М. Аналіз небезпек під час розриву автоцистерни. *Розвиток транспорту*. 4(11). 2021. С. 129-136.
8. Стоєцький В. Ф., Дранишников Л. В. Прогнозування наслідків аварій на потенційно небезпечних виробничих об'єктах. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2013. № 43. С. 114-122.
9. Костанян В. Р., Горобинський С. В. Визначення ризиків виникнення нештатних ситуацій на технологічних об'єктах газотранспортної системи. *Нафтова і газова промисловість*. 2011. №3. С. 50-53.
10. Кривенко Г. М. Возняк М. П., Возняк Л. В., Кривенко С. О. Дослідження впливу діаметра трубопроводу на поширення ударної хвилі у аварійних ситуаціях. *Науковий вісник*. 1(36). 2014. 110-117 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 04.11.2025 р.

Прийнято до друку 23.11.2025 р.

MEASURES TO PREVENT EXPLOSION AND FIRE HAZARDS IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

**Ya. M. Semchuk , G. M. Kryvenko , H. G. Hrytsuliak ,
O. V. Kryvenko **

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, Karpatska str. 15;
ph. +38(0342)72-71-58; e-mail: bzhd@nung.edu.ua*

One of the main dangers of the oil and gas industry is a sufficiently high level of risk of explosions and fires caused by the presence in the processes of extraction, transportation and storage of significant masses of hydrocarbons, which under certain conditions can create explosive and fire-hazardous concentrations of flammable gases or vapors. To prevent the occurrence of such conditions, safety regulations provide for a number of design and planning standards and means of a technical, technological and organizational nature. Ventilation of explosion-hazardous premises plays an important role in preventing the occurrence of dangerous situations. One of the important purposes of ventilation is to prevent the formation of explosive concentrations of flammable gases, vapors or dust. Therefore, the prevention of explosion and fire hazards in the oil and gas industry is relevant. The

purpose of the work is to clarify the methodology for determining indicators that regulate explosion and fire hazards at fuel and energy complex facilities. To achieve the set goal, the following tasks were solved: substantiation of the definition of indicators regulating explosion and fire hazards at oil and gas facilities and measures to prevent explosion and fire hazards. Due to certain terminological and substantive changes that have occurred during the formation of the regulatory framework for labor protection in recent decades, the definition of the lower concentration limit of explosion and the lower concentration limit of flame propagation, which regulate explosion and fire hazards, requires clarification. Measures to prevent explosion and fire hazards within working areas that do not have spatial restrictions are based primarily on controlling air gas contamination in order to promptly detect dangerous concentrations and prevent the presence of sources of ignition (ignition) of gas-air mixtures in dangerous areas (principles of "concentration and localization"). Measures for preventing explosion and fire hazards within working areas that do not have spatial restrictions are presented, and a refined methodology for determining indicators that regulate explosion and fire hazards at fuel and energy complex facilities is provided.

Keywords: Exhaust emergency ventilation, concentration, probability of mixture non-ignition, degree of mixture heterogeneity, explosive situation.