

2014 – 471 pp.

26. Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities. Safety guide DS427 – Vienna: International Atomic Energy Agency, Draft Version 8.5, November 2016 – 70 pp.

27. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. GSR Part 7–Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015 – 136 pp.

*Поступила 12.02.2018р.*

УДК 504.054:05 614.7

Т.М. Яцишин, Івано-Франківськ

### **ВИБІР МАТЕМАТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОЛУМ'Я АВАРІЙНОГО ГАЗОВОГО ФАКЕЛУ**

**Abstract.** The main characteristics of gas flare burning have been investigated and the processes of diffusive burning during emergencies. The mathematic regularities for definition the heat-affected zone have been analyzed. The dependence of gas flare intensity change determined by its distance from wellhead has been given as an example which makes it possible to define the safe distance from the flare center where the staff can work for a long period of time.

#### **Актуальність**

На різних етапах діяльності нафтогазовидобувної галузі існує високий ризик виникнення некерованих аварійних ситуацій. Окремої уваги потребують аварії, пов'язані з появою фонтану на свердловинах [1]. Такі екстремальні ситуації можуть виникати як при розвідувальних роботах, спорудженні свердловини так і на свердловинах, виведених з експлуатації. Причинами цих аварій можуть бути: відмови механізмів, людський фактор, порушення технології видобутку, природні катастрофи тощо. При цьому, окрім значних матеріальних затрат, присутні колосальні екологічні збитки, які точно оцінити практично не вдається.

В праці В.А. Кузьменко наведено причини та обставини виникнення понад 410 газо-нафто-водопроявів та відкритих фонтанів, в середньому біля 8 фонтанів щорічно [2]. Наведені дані дають можливість оцінити глобальні наслідки, які виникають при даного роду аварійних ситуаціях. Дослідження А.П. Хаустова і М.М. Редіна [3] вказують на те, що значний вплив при аварійному фонтануванні відбувається на атмосферне повітря, куди

потрапляють CO<sub>2</sub>, CO, сажа, NO<sub>x</sub>, CnHm, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>, бенз(а)пирен тощо. Крім цього, мають місце аварії на газових та нафтопродуктових магістральних трубопроводах, де також проходить некерований процес горіння.

Згідно Директиви 2008/50/ЄС Європейського парламенту та ради [4] висунуто вимоги зменшення забруднення довкілля. Тому актуальними є дослідження, що спрямовані на попередження виникнення фонтанів та інших споріднених аварій, прогнозування та оцінка їх ймовірних впливів і наслідків та визначення зон високого ризику при аварійному фонтануванні на нафтогазових свердловинах. Розробка відповідних заходів дозволить підвищити рівень екологічної безпеки галузі.

### **Постановка задачі**

Як відомо, *газовими* вважаються фонтани з вмістом горючого газу не менше 95% за масою, *газонафтовими* – газу більше 50% і нафти менше 50% по масі, *нафтовими* – з дебітом нафти більше ніж 50% по масі. Крім того, газові та газонафтові фонтани поділяють по потужності (дебету), тобто витраті: до 2 млн. м<sup>3</sup>/добу – *слабкі*, *середньої потужності* – від 2 млн. м<sup>3</sup>/добу до 5 млн. м<sup>3</sup>/добу, *потужні* – понад млн. м<sup>3</sup>/добу. При аваріях на свердловинах витікання газу з фонтанної арматури відбувається при високих перепадах тиску і на зрізі труби створюється швидкість витікання, рівна швидкості звуку. Більша частина свердловин, продукція яких характеризується високим газовим фактором, що фонтанують, супроводжується загоранням викинуваного флюїду.

Пожежі на відкритих фонтануючих газонафтових свердловинах є одним з найбільш складних видів аварій і завдають величезної шкоди економіці та навколишньому середовищу [5]. Тому необхідно максимально швидко локалізувати ці аварії, що дасть можливість скоротити масштаби впливу на довкілля. Основну роботу виконують протифонтанні заходи, умови праці яких є на межі гранично допустимих навантажень. При відкритих пожежах існує ряд факторів, визначення яких дають можливість встановити межу безпечної роботи протифонтанної служби. До таких небезпечних факторів відноситься випромінювання полум'я [6].

В екстремальних умовах необхідно мати науково обґрунтовані методи оцінки небезпечних факторів. Тому і виникає необхідність в розрахунках основних параметрів випромінювання факела полум'я фонтана, що дозволить визначати техногенне навантаження на довкілля, допустимий час перебування і межі зон, в яких можуть проводитися ті чи інші види аварійно-рятувальних робіт.

Для вирішення вищезазначених проблемних питань необхідно виконати низку завдань, серед яких є:

- дослідити особливості процесу дифузійного горіння газів, що відбувається при руйнуванні магістральних трубопроводів, на аварійній фонтануючій морській або сухопутній свердловинах газового або

газоконденсатного родовища, на газопереробних заводах тощо;

- оцінити зону теплового впливу на основі розрахунків зміни інтенсивності випромінювання факела полум'я фонтана в залежності від відстані до гирла свердловини (джерела горіння).

## **Вирішення задачі**

### **Характеристики горіння аварійного газового факела**

Дифузійне горіння газів в реальних умовах відбувається в тих випадках, коли газ або пари спалахнуть відразу ж після початку їх аварійного витікання. При дифузійному горінні горюча речовина й окислювач не перемішані, і окислювання відбувається на їхній границі, у досить добре обкресленій зоні горіння. Концентрація окислювача в зоні горіння різко зменшується до нуля. Дифузійне горіння лімітується або дифузиею окислювача в зону полум'я, або дифузиею горючих випарів, або обома процесами [7]. Типовим і досить поширеним прикладом є дифузійне горіння газу при руйнуванні магістральних трубопроводів, на аварійній фонтануючій морській або сухопутній свердловинах газового або газоконденсатного родовища та на газопереробних заводах. Пожежі на відкритому просторі, до яких належать вищеперераховані аварійні ситуації, характеризуються вільним газообміном з навколишнім середовищем, що обумовлює високу швидкість протікання процесів горіння. При цьому теплообмін здійснюється конвекцією і випромінюванням.

Усі пожежі супроводжуються дифузійним турбулентним горінням. При турбулентному горінні горючі компоненти окисляються не цілком, утворюються великі молі з надлишком горючих випарів, які лише частково згоряють, а значна частина випарів, що не цілком окислилися, виноситься за межі зони горіння.

При дифузійному горінні змішування газу і повітря відбувається в зоні горіння в наслідок турбулентної дифузії. Швидкість горіння і форма полум'я залежить від інтенсивності турбулентної дифузії. Найменша швидкість горіння і найбільше полум'я будуть при ламінарній течії газу в повітряному середовищі.

На рис. 1 зображені схема дифузійного ламінарного полум'я [8] та реальний газоконденсатний фонтан з турбулентним режимом на свердловині №111 Куличихінського НГКР Гадяцького промислу ГПУ «Полтавагазвидобування» [9].

Розглядаючи особливості такого горіння можна припустити, що горить свердловина природного газу, основним компонентом якого є метан. Горіння дифузійне, в ламінарному режимі, концентраційна межа поширення метану 5-15% об.

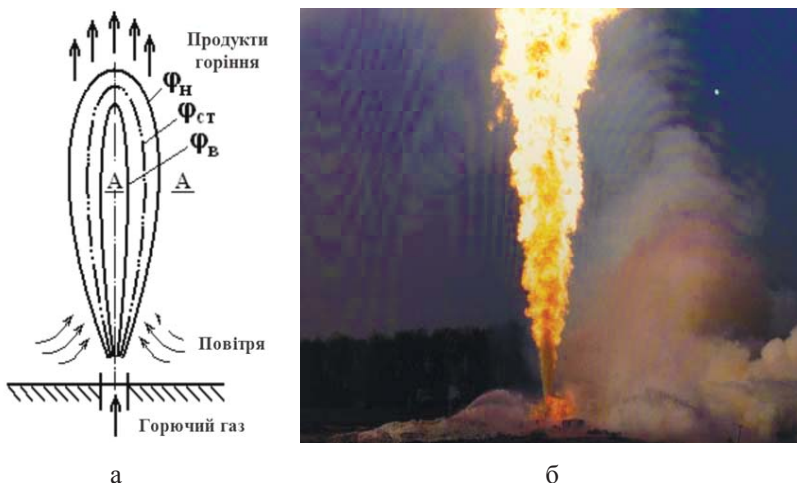


Рис. 1. Види полум'я: а – схема дифузійного ламінарного полум'я [8], б – турбулентний режим полум'я на фонтануючій свердловині № 111 Куличихінського НГКР [9]

На рис. 2 представлено зміну концентрацій пального (а) та зміну швидкості реакції горіння у фронті полум'я (б) [8].

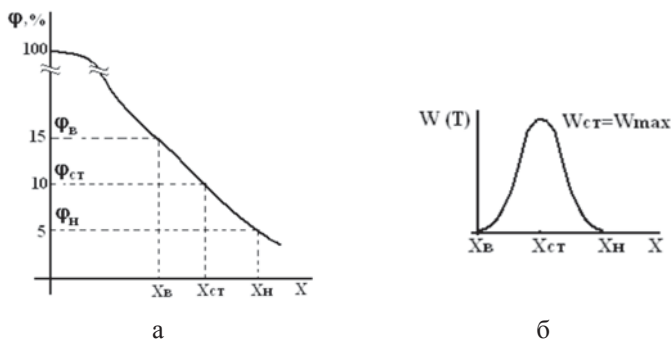


Рис. 2. Характеристики полум'я газового фонтану: а – зміна концентрації пального; б – зміна швидкості реакції горіння у фронті полум'я [8]

Концентрація газу зменшується від 100% на осі струменю через верхню  $\varphi_v$  до нижньої  $\varphi_n$  концентраційної межі на її периферії.

Горіння відбувається тільки в інтервалі концентрацій від  $\varphi_v$  до  $\varphi_n$ , тобто в межах області його займання. Швидкість реакції горіння  $W(T)$  буде дорівнює нулю на концентраційній межі поширення і буде максимальною при  $\varphi_{ст}$ . Таким чином, відстань між  $x_n$  і  $x_v$  визначає товщину фронту дифузійного

полум'я,  $\delta_{\phi n} = x_n - x_0$ . Для дифузійного полум'я товщина фронту полум'я має наступні значення:  $\delta_{\phi n} = 0.1-10$  мм.

При викиді нафти і газу із свердловини продукт виходить зі швидкістю, близькою до швидкості звуку. За таких швидкостей горіння має чітко виражений турбулентний режим (рис. 1б). Фонтан, що горить, за висотою умовно можна розділити на наступні зони [5]:

1. Зона відриву полум'я, частина фонтану безпосередньо від гирла до видимої зони горіння факела; вона залежить від температури горіння, тиску і може сягати до трьох метрів.

2. Зона запалювання, в якій відбувається запалювання і горіння фонтана. У цій зоні газ і нафта повністю згорають, оскільки повітря ще може проникнути в цю зону.

3. Зона горіння, яка починається від верху зони запалювання до верхньої частини факела.

Визначення методів, вибір засобів та безпечна робота персоналу для локалізації палаючого фонтану вимагає оцінки зон пожежі: горіння, теплового впливу, задимлення. Зона горіння – це частина простору, у якій протікають процеси термічної підготовки горючих речовин і саме горіння. Зона горіння включає обсяг, обмежений фронтом полум'я і поверхнею палаючої речовини. Зона теплового впливу – це прилягаюча до зони горіння частина простору, у границях якої протікають процеси теплообміну між поверхнею зони горіння і навколишніх конструкцій і речовинами. Зовнішня границя зони теплового впливу проходить там, де тепловий вплив викликає помітні зміни властивостей матеріалів і конструкцій, або створюються умови, що перешкоджають роботі людей без засобів індивідуального захисту. Зона задимлення – частина простору, що примикає до зони горіння, у якій неможливе перебування людей без засобів захисту органів дихання або ускладнене орієнтування в результаті недостатньої видимості.

### **Визначення зміни інтенсивності випромінювання факела полум'я фонтана в залежності від відстані до гирла свердловини**

Розрахунок параметрів горіння полум'я факела газового фонтану можна здійснювати використовуючи наступні математичні формули [5, 6, 8, 10].

Сучасні наукові дослідження показали, що при витіканні горючого газу з отворів великого діаметра ( $d > 50$  мм) довжина (висота) факелу  $H_\phi$  збільшується пропорційно діаметру отвору в степені 0.8:

$$H_\phi = d_0^{0.8} \cdot \quad (1)$$

Для метану довжину факелу можна розрахувати за формулою

$$H_\phi = \frac{120d_0^{0.8}}{1 + 30/W_{II}}, \quad (2)$$

де  $W_{II}$  – швидкість газового потоку, а для пропан-бутанової суміші:

$$H_{\phi} = \frac{200d_0^{0.8}}{1 + 25/W_{II}}. \quad (3)$$

Дебіт газового фонтану (в млн. м<sup>3</sup>/добу) розраховується за формулою:

$$D = 0,0025H_{\phi}^2. \quad (4)$$

Практика показує, що на реальних пожежах ламінарний режим горіння практично не зустрічається. В пласті газового родовища газ знаходиться під тиском, тому витрати газу при аварійному витіканні будуть дуже великими – до 100 м<sup>3</sup>/с на пожежах фонтануючих газових свердловин (до 10 млн. м<sup>3</sup>/добу). При таких умовах режими витікання і горіння будуть турбулентними. Для розрахунку необхідних сил і вибору засобів для гасіння палаючих газових факелів необхідно знати витрату газу. Вихідні дані для його розрахунку практично завжди відсутні, оскільки невідомі або тиск газу в технологічному обладнанні, або в пласті родовища. Тому на практиці використовуються експериментально встановлені залежності висоти полум'я факела від витрати газу (табл. 1) [8].

Таблиця 1

Залежність висоти полум'я від витрати газу газового фонтану при різних режимах горіння

Режим горіння	Витрата газу, м <sup>3</sup> /с	Висота полум'я, м
Турбулентний	5	16
	10	22
	20	28
	30	35
Ламінарний	1,8·10 <sup>-6</sup>	25·10 <sup>-2</sup>

Режим витікання газового струменю визначається шляхом порівняння швидкості витікання газового струменя зі швидкістю звуку:

$$V = \frac{4D_c}{\pi d^2}, \quad (5)$$

де  $D_c$  – секундна витрата газу (м<sup>3</sup>/сек),  $d$  – діаметр гирла свердловини, м. Швидкість звуку в метані становить 430 м/сек.

Після складання рівняння реакцій горіння на повітрі розраховується нижня теплота згорання кожного компоненту горючої суміші, спираючись на наслідок із закону Гесса.

$$Q_n^{моль} = \Delta_f H^0(\Gamma) - \sum_{i=1}^n \nu_i \Delta_f H_i^0(ПГ). \quad (6)$$

Стандартне теплоутворення горючих сумішей ( $\Gamma$ ) і продуктів горіння ( $ПГ$ ) вибирається з довідкової літератури. Для переведення теплоти згорання  $Q_n^{моль}$  в питомі величини  $Q_n^{ншт}$  (на 1 м<sup>3</sup>) використовується формула:

$$Q_n^{num} = \frac{Q_n^{mоль} \cdot 1000}{24,45}, \quad (7)$$

де 24,45 – молярний об'єм газу (л/моль) при 25<sup>0</sup> С (298 К).

Теплота згоряння газової суміші розраховується за рівнянням:

$$Q_n^{cm} = \sum_i Q_n^{num} \frac{\varphi_i}{100}, \quad (8)$$

де  $\varphi_i$  – об'ємна частка (в %)  $i$  – горючого газу в суміші.

Об'єм продуктів горіння горючої суміші знаходиться за формулою:

$$V_i = \sum_j v_i^j \frac{\varphi_j}{100}, \quad (9)$$

де  $V_i$  – об'єм  $i$ -того продукту горіння,  $v_i^j$  – стехіометричний коефіцієнт при  $i$ -тому продукті горіння, що утворюється при горінні  $j$ -того газу,  $\varphi_j$  – об'ємна частка (в %)  $j$ -того газу в суміші.

Теплові втрати на випромінювання розраховуються за формулою:

$$\eta_u = 0,048\sqrt{M}, \quad (10)$$

де  $M$  – середня молярна маса газу:

$$M = \sum_i M_i \frac{\varphi_i}{100}, \quad (11)$$

де  $M_i$  – молярна маса  $i$ -того газу,  $\varphi_i$  – об'ємна частка  $i$ -того газу (в %). Сумування необхідно проводити за всіма компонентами суміші, горючими і негорючими.

Температура газового факелу розраховується за методом середніх теплоємностей, перевівши одиниці виміру з кДж в Дж:

$$T_z = 273,15 + \frac{(\eta_u + \eta_n) Q_n^{cm}}{\sum_i C_{p,i} V_i}, \quad (12)$$

де  $\eta_u$  – втрати на випромінювання,  $\eta_n$  – втрати за рахунок хімічного недопау.

Зміна потужності випромінювання газового фонтану  $q$  в залежності від відстані може бути знайдено з рівняння:

$$q = \frac{\eta_u Q_n^{cm} D_c}{4\pi R^2}, \quad (13)$$

де  $R$  – відстань від середини факелу до точки на поверхні землі. Враховуючи,

що  $R^2 = \left(\frac{H_\phi}{2}\right)^2 + L^2$ ,  $L$  – відстань від точки на поверхні до гирла газового фонтану отримуємо:

$$q = \frac{\eta_u Q_u^{cm} D_c}{4\pi \left[ \left( \frac{H_\phi}{2} \right)^2 + L^2 \right]} \quad (14)$$

На рис. 3 наведено залежність потужності випромінювання від відстані до джерела горіння для заданих умов: газова суміш складається 85 об. % (0,85) метану  $CH_4$  і 10 об. % (0,10) етану  $C_2H_6$ ,  $\eta_u = 0,206$ ,  $Q_u^{cm} = 33727,4$  кДж/м<sup>3</sup>,  $D_c = 58,6$  м<sup>3</sup>/сек,  $H_\phi = 45$  м та  $L = 10, 20, 40, 60, 80, 100$  м.

Знаючи величину інтенсивності теплового випромінювання, яке витримує особовий склад ( $q$ ), розраховується гранична (безпечна) відстань  $L_{без}$  від центру факела (див. рис. 4), на якому можуть працювати люди тривалий час.

При розрахунках приймають, що теплове випромінювання з інтенсивністю в  $5,6 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>·год є безпечним і особовий склад може витримати такі теплові навантаження без спеціального захисту протягом необмеженого часу [5]:

$$L_{без} = \left( R^2 - \left( h + \frac{H_\phi}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

де  $H$  – відстань від землі до нижньої точки факела полум'я.

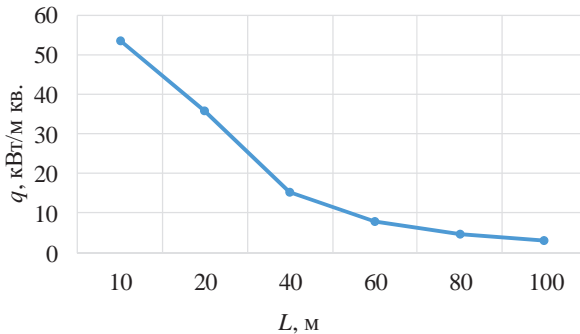


Рис. 3. Залежність потужності випромінювання факела від відстані до гирла свердловини

При сильному вітрі полум'я факела відхиляється від вертикального положення і зона теплового впливу має форму еліпса. В цьому випадку безпечна відстань від гирла свердловини в протилежному напрямку вітру збільшується і можна розрахувати за формулою [5]:

$$L_{без} = \left( 1,75 H_\phi^{2,5} - \left( h + \frac{H_\phi}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$



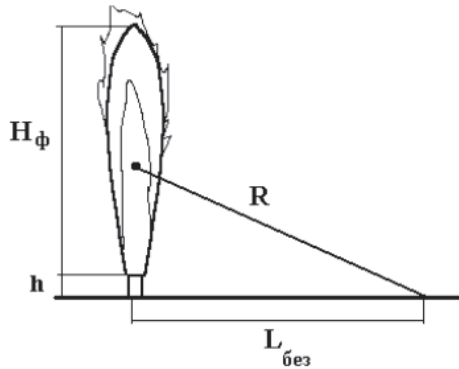


Рис. 4. Визначення безпечної відстань від гирла палаючої свердловини

При врахуванні вище перелічених параметрів випромінювання полум'я аварійного газового факелу є можливість визначення безпечного режиму роботи працівників та забезпечення оперативної локалізації аварійної ситуації, що дозволить мінімізувати масштаби негативного екологічного впливу на довкілля.

### Висновки

В роботі досліджено основні характеристики перебігу горіння аварійного газового факелу і процеси дифузійного горіння газів при аварійних ситуаціях. Проаналізовано математичні закономірності для визначення зони теплового впливу. Наведено приклад залежності зміни інтенсивності випромінювання факела полум'я фонтана в залежності від відстані до гирла свердловини (джерела горіння), яка дає можливість визначити безпечну відстань  $L_{без}$  від центру факела на якому може працювати персонал тривалий час. Врахування параметрів випромінювання та інших характеристик аварійного палаючого газового фонтану дозволяє здійснити вибір найбільш оптимальних методів його гасіння [11].

1. Яцишин Т.М. Аналіз впливу аварійних ситуацій на навколишнє середовище при бурінні нафтогазових свердловин / Т.М. Яцишин // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім. Г.С. Пухова НАН України – Вип. 78. – К.: 2017. – С.81-87.
2. Кузьменко В.А. Газо-нефте-водопроявления и открытые фонтаны в период с 1944 по 2000 годы. Обстоятельства и причины их возникновения / В.А. Кузьменко // Киев. – 2006. – 521 с.
3. Чрезвычайные ситуации и экологическая безопасность в нефтегазовом комплексе Хаустов А.П., Редина М.М. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://docs.cntd.ru/document/499075302>

4. Директива 2008/50/ЄС Європейського парламенту та ради від 21 травня 2008 року про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи.
5. Тимофеева С.С., Дроздова Т.И., Плотникова Г.В., Гольчевский В.Ф. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 178 с.
6. Расчёт границ опасных зон пожара открыто фонтанирующих газонефтяных скважин [Текст]: метод. указания / В. П. Перхуткин. – Ухта: УГТУ, 2014. – 15 с.
7. Пожежа і її розвиток. Способи припинення горіння <http://nuczu.edu.ua/material/avtomat/ukr/lessons/2/1.html>
8. Маскаева Л.Н., Марков В.Ф. Теоретический расчет основных параметров горения газового фонтана, Екатеринбург: ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ, 2008, – 28 с.
9. Ліквідація палаючого газоконденсатного фонтану на свердловині №111 Куличихінського НГКР ГПУ «Полтавагазвидобування». – ЛІКВО. – 2004р.
10. Тарахно О.В., Жернокльов К.В., Трегубов Д.Г. Теорія розвитку та припинення горіння. Методичні вказівки до вивчення курсу, контрольні завдання для курсантів, слухачів денної та заочної форм навчання – Харків: Університет цивільного захисту України, 2011 – 207 с.
11. Добровольський І.В. Дослідження технічних показників устаткування для гідробразного відрізання обладнання з фонтануючої свердловини / І.В. Добровольський, М.М. Лях, Н.В. Федоляк, Т.М. Яцишин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017 - № 1(62). – С.35-42.

*Поступила 8.02.2018р.*

УДК 504.05:502.55

О.О. Попов, Київ

В.О. Ковач, Київ

## **ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ ЗАБРУДНЕННЯМ ДОВКІЛЛЯ**

**Abstract.** The question of the use of mathematical tools to support effective management decision making under emergency situation. The analysis of the stages of development of such situations and relevant affecting factors are considered in the article. The features of each stage of consideration parameters in mathematical models are described. The conditions and procedure of decision making under emergency situation is considered.

### **Постановка проблеми у загальному вигляді**

Антропогенне навантаження на навколишнє природне середовище в Україні привело до значного підвищення ризику виникнення надзвичайних