

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ УМОВНОЇ ЙМОВІРНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОПІКУ ШКІРИ

О.І. Вальченко, Г.Б. Гишко, А.М. Остапова  
(подав д.т.н., проф. Б.Ф. Самойленко)

Пропонується метод, який дозволяє визначити умовні ймовірності технічного опіку шкіри в типових спорудах, що необхідно для розподілу сил і засобів конфлікуючих сторін.

Ймовірність технічного опіку шкіри термобаричними зарядами (ТЗ) розраховують при ізольованій дії трьох основних уражаючих факторів (теплова енергія, повітряна ударна хвиля і осколки), так як до теперішнього часу їх спільна дія залишається мало вивченою. Сумарна ймовірність ураження при цьому розраховується (з гарантією незавищення результатів) як ймовірність незалежних подій [1]:

$$P_{\Sigma} = 1 - (1 - P_T) \cdot (1 - P_{\Phi}) \cdot (1 - P_{\text{оск}}), \quad (1)$$

де  $P_T$  – ймовірність ураження термобаричною дією (ТД);  $P_{\Phi}$  – ймовірність ураження повітряною ударною хвилею (ПУХ);  $P_{\text{оск}}$  – ймовірність ураження осколками.

Для виявлення характеристик, що впливають на потужність уражаючої дії (ПУД) ТЗ, розглянемо їх можливості.

Високотемпературні поля (ВТП) являють собою суцільну об'ємну зону, яка утворюється при інтенсивному згорянні металодисперсної запалювальної суміші в приземному шарі повітря або при змиканні полум'я окремих наземних осередків горіння. Основним уражаючим фактором (УФ) при дії ВТП є тепловий вплив променистих і конвективних теплових потоків від зони суцільного полум'я.

Високотемпературне поле характеризується просторовими (лінійні розміри, об'єм зони горіння), тимчасовими (час існування) і енергетичними (сумарний імпульс теплової енергії, тепловий потік) параметрами, причому внаслідок динамічності протікаючих в ВТП процесів просторові і енергетичні характеристики є функціями часу, тобто процесами нестационарними.

Прогнозування характеру ВТП може здійснюватися за допомогою функцій ураження, пов'язуючих ймовірність теплового ураження

об'єктів з величиною теплових потоків, режимом їх надходження і тривалістю дії.

Для умов короткочасного впливу на шкіру теплових потоків оцінку ймовірності ураження шкірних покривів у високотемпературних полях можна провести по величині імпульсу теплової енергії. Ймовірність температурних уражень шкіри 1, 2, 3 ступеня в залежності від величини падаючого імпульсу теплової енергії описується інтегральною функцією нормального розподілу [1]:

$$P(U_{\text{т.е}}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{U_{\text{т.е}}} \exp\left[-\frac{(U_{\text{т.е}} - U_{(0,5)})^2}{2\sigma^2}\right] dU_{\text{т.е}}, \quad (2)$$

де  $U_{\text{т.е}}$  – значення імпульсу теплової енергії;  $U_{(0,5)}$  – величина імпульсу теплової енергії, що викликає опік не нижче заданого ступеня з ймовірністю 0,5;  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення уражаючого значення імпульсу теплової енергії.

Профіль імпульсів теплової енергії в зоні дії одиночних ТЗ знаходиться по залежності [1]:

$$U_{\text{т.е}}(t) = 3,875U_{\text{т.е.ср}} \left[ \exp\left[-\left(\frac{R}{R_m}\right)^2\right] - 0,368 \right], \quad (3)$$

де  $R$  – відстань до цілі від центру об'єкту, м;  $R_m$  – радіус максимального теплового впливу, м;  $U_{\text{т.е.ср}}$  – тепловий імпульс, усереднений по площі теплового впливу, кДж/м<sup>2</sup>.

Залежність (2) має обмежену область застосування, тому що в ній не враховується час впливу теплових потоків. Ймовірність технічного опіку шкіри різноманітного ступеня тяжкості, виведення з ладу на певні терміни, що враховує як величину імпульсу теплової енергії, так і час впливу теплових потоків, можна визначити по залежності [1]:

$$P(U_{\text{т.е}}, t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U_{\text{т.е}}}{1,123U_{0,5}t^{0,28}}\right)^{2,538}\right], \quad (4)$$

де  $U_{0,5}$  – імпульс теплової енергії, що викликає термічний опік з ймовірністю 0,5 за час  $t = 1$ с;  $t$  – час впливу теплових потоків, с.

Величина  $U_{0,5}$  (умова утворення опіків з ймовірністю 0,5) стосовно спадаючого теплового потоку виявляється значенням константи у наступних рівняннях:

- опіки 1 ступеня –  $gt^{0,72} = 80 \text{ кДж/м}^2$  ;  
 опіки 2 ступеня –  $gt^{0,72} = 135 \text{ кДж/м}^2$  ;  
 опіки 3 ступеня –  $gt^{0,72} = 210 \text{ кДж/м}^2$  .

Використання методу енергетичної подоби і теорії розмірностей дозволяють визначити енергетичні параметри ВТП, що утворюються в результаті горіння і вибуху ТЗ. У цьому випадку величина сумарного поглинутого імпульсу теплової енергії визначається системою рівнянь з використанням маси ТЗ і теплоти його вибуху [1] та дорівнює:

$$\bar{U}_{\text{сум}} = 2,53 \left( 1 + 1387 \bar{R}^2 \right)^{-1} + U_t \quad \text{при } \bar{R} < 0,072; \quad (5)$$

$$\bar{U}_{\text{сум}} = 1,5 + U_t - (\bar{R} - 0,072) \left( 13,2 + 4,5 \times 10^{20} \frac{Q - Q_0}{Q^4} \right) \quad \text{при } 0,072 \leq \bar{R} \leq 0,119; \quad (6)$$

$$\bar{U}_{\text{сум}} = 2,53 \left( 1 + 1387 \bar{R}^2 \right)^{-1} \quad \text{при } \bar{R} > 0,119, \quad (7)$$

де  $\bar{U}_{\text{сум}} = \frac{U_{\text{сум}}}{E^{1/3} Q^{1/3}}$  – приведений сумарний імпульс теплової енергії;

$\bar{R} = \frac{RQ^{1/3}}{E^{1/3}}$  – приведений радіус, м;  $U_t = 2,3 \times 10^2 \frac{Q - Q_0}{E^4}$  – приведений імпульс теплової енергії, який передається шляхом конвекції, Дж/м<sup>2</sup>;  $E = Q_{\text{пт.еф}} M_{\text{тбс}}$  – теплота, що виділяється при вибуху ТЗ;  $Q$  – середня температура ВТП, К<sup>0</sup>;  $Q_0$  – початкова температура поверхні об'єкта.

Найбільш загальною і універсальною характеристикою повітряної ударної хвилі, що робить основний вплив на уражаючу дію є питома енергія ( $E_{\text{пт}}$ ), яка уявляє з себе сумарну питому надлишкову механічну енергію повітряних потоків, які прийшли слідом за фронтом ПУХ. У загальному випадку для однієї ПУХ, незалежно від її вигляду, питома енергія визначається по формулі [1]:

$$E_{\text{пт}} = \int_0^{t^+} \frac{P(t)U(t)}{k-1} dt + \int_0^{t^+} \frac{\rho(t)U(t)}{2} dt, \quad (8)$$

де  $P(t)$  і  $\rho(t)$  – надлишковий тиск і щільність повітря в залежності від часу;  $U(t)$  – масова швидкість повітря;  $t^+$  – тривалість фази стиснення ПУХ;  $k$  – показник ударної адіабати повітря.

Розрахунок величини ефективної питомої енергії ПУХ можна провести по наближених залежностях, отриманих інтерполяцією результатів чисельного інтегрування рівняння (8) [1]:

$$E_{e,пт} = \begin{cases} 8,8 \left( P_{\phi} \cdot 10^{-5} \right)^{1,66} t^+ & \text{при } 0,1 \times 10^5 < P_{\phi} \leq 1,5 \times 10^5, \text{ Па;} \\ \left( -11,35 + 19,25 \left[ P_{\phi} 10^{-5} \right] \right) t^+ & \text{при } 1,5 \times 10^5 < P_{\phi} \leq 8 \times 10^5, \text{ Па;} \\ 17,83 \left( P_{\phi} \cdot 10^{-5} \right) t^+ & \text{при } 8 \times 10^5 < P_{\phi} \leq 14 \times 10^5, \text{ Па;} \\ -50,38 + 21,44 \left( P_{\phi} 10^{-5} \right) t^+ & \text{при } 14 \times 10^5 < P_{\phi} \leq 20 \times 10^5, \text{ Па.} \end{cases} \quad (9)$$

Дещо інший вигляд рівнянь може бути отриманий на основі чисельного інтегрування рівняння (8) по методу Сімпсона. При цьому параметри  $k$  і  $b$  визначаються за отриманими на основі регресивного аналізу даними Станюковича [1] і Бейкера [2] рівнянням:

$$k = 1,402 - 1,49 \times 10^{-3} \overline{P_{\phi}}; \quad (10)$$

$$b = 0,5, \quad \text{при } \overline{P_{\phi}} \leq 0,06;$$

$$b = -0,132 + 3,3883 \overline{P_{\phi}} - 2,458 \overline{P_{\phi}^2} + 0,644 \overline{P_{\phi}^3}, \quad \text{при } 0,06 < \overline{P_{\phi}} \leq 2,0.$$

Шляхом інтерполяції результатів чисельного інтегрування можна отримати залежності, що дозволяють визначати значення ефективної питомої і сумарної питомої енергії ПУХ (в кДж/м<sup>2</sup>) із середньою відносною помилкою не перевищуючою 1 % (у порівнянні з результатами чисельного інтегрування) [1]:

$$E_{e,пт} = \left[ 20,71 \overline{P_{\phi}} \cdot \exp \left( -0,58 \overline{P_{\phi}} \right) \right] t^+ \quad \text{при } \overline{P_{\phi}} < 1,0;$$

$$E_{e,пт} = \left[ -8,52 + 24,74 \overline{P_{\phi}} - 2,05 \overline{P_{\phi}^2} + 0,18 \overline{P_{\phi}^3} - 3,86 \times 10^{-3} \overline{P_{\phi}^4} \right] t^+ \quad \text{при } 1,0 \leq \overline{P_{\phi}} \leq 2,0;$$

$$E_{пт} = \left[ 20,71 \overline{P_{\phi}} \exp \left( -0,46 \overline{P_{\phi}} \right) \right] t^+ \quad \text{при } \overline{P_{\phi}} \leq 1,0;$$

$$E_{пт} = \left[ -10,52 + 29,82 \overline{P_{\phi}} - 1,43 \overline{P_{\phi}^2} + 0,19 \overline{P_{\phi}^3} - 3,98 \times 10^{-3} \overline{P_{\phi}^4} \right] t^+ \quad \text{при } 1,0 \leq \overline{P_{\phi}} \leq 2,0.$$

Запропонований метод дозволяє з достатньою точністю визначати параметри ПУХ, що генеруються при вибусі ТЗ.

Більш універсальним є підхід, який полягає в тому, що в якості основної характеристики ПУХ, яка визначає ефект первинного опіку шкі-

ри приймається ефективна питома енергія [2]. Функція технічного опіку шкіри при дії ПУХ представляється у вигляді розподілу Вейбулла [2]:

$$P = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{E_{e.пт}}{K_v b} \right)^c \right],$$

де  $P$  – ймовірність технічного опіку шкіри;  $E_{e.пт}$  – ефективна питома енергія ПУХ, що впливає безпосередньо на технічний опік шкіри;  $b$  – параметр масштабу;  $c$  – показник форми;  $K_v$  – емпіричний коефіцієнт орієнтації.

Проте, наявність в споруді навіть невеликого розвантажувального отвору істотно впливає на ударно-хвильове поле (УХП), в порівнянні із замкнутим об'ємом. Параметрична функція технічного опіку шкіри усередині споруди має вигляд [1]:

$$P = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{E/V}{b} \right)^c \right],$$

де  $E/V$  – питома об'ємна енергія УХП, кДж/м<sup>2</sup>;  $V$  – внутрішній об'єм споруди, м<sup>3</sup>;  $b$ ,  $c$  – параметри функції ураження для ураження по 2-му типу (у [2] пропонується вибрати  $b = 50$  кДж/м<sup>2</sup>,  $c = 2.85$ ).

Таким чином, на основі даного методу стає можливим визначення рівнів ймовірності технічного опіку шкіри в закритих спорудах і спорудах, в яких є розвантажувальні отвори. Даний метод дозволяє виявити на основі функцій технічного опіку шкіри уражаючу дію типових об'єктів термобаричними зарядами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Физика взрыва / Под ред. Е.П. Станюковича. – М: Наука, 1975. – 704 с.
2. Взрывные явления. Оценка и последствия / Под ред. Я.В. Зельдовича. – М: Мир, 1986. – 319 с.

*Подана до редколегії 25.08.2000*