

ДОСЛІДЖЕННЯ РУЙНІВНОЇ ДІЇ ВИБУХІВ У СЕРЕДИНІ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Розглянуто засоби захисту будівель від руйнування при вибухах на виробництві. Запропоновано методику розрахунку траєкторій руху зруйнованих частин будівлі під дією рушійної сили — тиску вибухової хвилі. Розв'язок систем диференціальних рівнянь руху елементів будівельних конструкцій виконано з використанням методів символічної комп'ютерної математики «Maple».

Ключові слова: вибухи на виробництві, руйнування промислових будівель, рух зруйнованих елементів, траєкторія руху, захист від руйнування.

Значна кількість харчових технологій вибухонебезпечні. Тому важливим є дослідження способів захисту промислових об'єктів, обладнання від руйнування, а працюючих на виробництві від травм [1].

Метою виконаних досліджень було дати аналіз захисту виробничих приміщень шляхом використання легкоскидаємих будівельних конструкцій і визначити

© В.С. Гуць, Н.В. Володченкова, В.М. Фалес, 2010

We consider the protection of buildings from destruction when there is explosion at work. Proposed method of calculating the trajectories of movement of the destroyed parts of the building under the influence moving force — pressure blast. The solution of systems of differential equations of motion elements of the constructions using the methods of symbolic computer mathematics «Maple».

Keywords: explosions in the production, destruction industrial buildings, destroyed by the movement of elements, the trajectory of protection from destruction.

можливу траєкторію зруйнованих елементів конструкцій при вибухах усередині приміщень.

Вибух на підприємствах із вибухонебезпечною технологією відбувається внаслідок витікання газоподібних або зріджених вуглеводневих сполук, утворення пилоповітряної суміші. Під час виготовлення пакувальних матеріалів, перемішуванні, транспортуванні і дозу-

ванні сипучих продуктів, реалізації багатьох технологічних процесів у повітрі робочої зони утворюються вибухонебезпечні суміші газів і пилу. У залежності від виду виробництва і застосованих технологій це можуть бути: пропілен, метан, пропан, ацетилен, етан, етиловий спирт, цукровий, борошняний, паперовий пил тощо. Загорання або вибух відбуваються, коли утворюється повітряна суміш газів або пилу у відповідній пропорції — вибухонебезпечному співвідношенні компонентів.

Результатом вибуху є утворення повітряно-ударної хвилі. Як кількісний показник стійкості до неї приймають значення надлишкового тиску, при якому будівлі, споруди, обладнання і їх конструктивні елементи зберігають свою цілісність або зазнають незначних пошкоджень. Це значення надлишкового тиску σ_p прийнято вважати межею стійкості об'єкта до ударної хвилі.

Існують декілька методик визначення надлишкового тиску у фронті повітряної ударної хвилі. Вони спираються на характеристики вибухової речовини і умови її розповсюдження.

Досвід експлуатації виробничих будівель і споруд свідчить, що найбільш руйнівними є вибухи у середині приміщення. Вони призводять до руйнування будівельних конструкцій, технологічного обладнання, значним економічним витратам, а у екстремальних випадках до загибелі людей.

Вибух може відбутися усередині приміщення при збігу аварійних обставин, коли утворюється вибухонебезпечне середовище, і при наявності випадкового джерела запалення, наприклад електричної іскри. Захисні заходи промислових будівель для вибухонебезпечних виробництв включають комплекс заходів, зв'язаних з можливістю зменшення ступеня руйнування як самого об'єкта так і споруд, що стоять поруч. При повному обваленні будівлі збільшується ймовірність знищення устаткування і загибелю людей під уламками конструкцій як у середині будівлі, так і за її межами. При частковому руйнуванні будівлі, коли, наприклад, зберігаються несучі конструкції — колони, ригеля, устаткування може бути легко відновлене або навіть не ушкоджене. Для обслуговуючого персоналу й у цьому випадку небезпека залишається високою через можливі важкі травми, опіки, але вона все-таки менша, чим при повному обваленні будівлі, тому основним напрямком забезпечення вибухозахисту є розробка систем попередження вибухів і нормативна регламентація відповідних технологічних процесів з урахуванням надійності різних апаратів, контролюючих і обмежувальних приладів і захисних пристроїв.

При сильних вибухах зруйновані частини будівель розлітаються на значну відстань від епіцентру, що може призвести до значних руйнувань поруч стоячих об'єктів. В цьому випадку важливим є визначення зон безпеки, відстані можливого попадання елементів зруйнованих будівельних конструкцій і інші промислові об'єкти.

Відповідно до вимог діючих стандартів виробничі процеси повинні розроблятися так, щоб ймовірність виникнення вибуху на будь-якій вибухонебезпечній ділянці протягом року не перевищувала 10^{-6} . Однак, незважаючи на всі попереджувальні технологічні й організаційно-технічні заходи, аварійні вибухи все-таки відбуваються. Зменшення наслідків вибуху за рахунок належного проектування будівель і споруд, спрямовані на зниження ступеня їхнього руйнування, часто виявляється досить ефективним. Санітарні норми і правила встановлюють конструктивні і об'ємно-планувальні

вимоги до будівель вибухонебезпечних виробництв. Будівельні противибухові заходи ґрунтуються на належному обліку і розрахунку різномісності конструкцій будівлі з метою забезпечення руйнування наперед визначених елементів конструкцій, за рахунок яких вибуховий вплив на інші був зменшеним, не перевищував їхньої несучої здатності і, отже вони залишалися не зруйновані. До них відносять такі, що легко скидаються (ЛСК) або легко руйнуються (ЛРК).

Це перш за все вікна, якщо в них встановлене звичайне скло, двері, розкривні ворота, конструкції з гіпсових плит, алюмінієвих і сталевих листів з легким утеплювачем, спеціальні стінові панелі, і інші.

Захисна дія запобіжних ЛСК і ЛРК конструкцій полягає в тому, що вони скидаються або руйнуються в початковій стадії вибуху, коли тиск газів продуктів вибуху не досяг критичного значення і є неруйнівним для основних несучих конструкцій каркаса будівлі. Через прорізи, що утворилися в результаті руйнування запобіжних конструкцій, надлишкові обсяги газів незгорілої суміші і продуктів вибуху викидаються з приміщення будівлі назовні. Завдяки цьому, навантаження на основні несучі конструкції зменшуються в порівнянні з тим навантаженням, що мало б місце при вибуху такої ж суміші в замкнутому об'ємі. Якщо в будівлі буде улаштована достатня кількість прорізів, закритих спеціальними панелями встановленими таким чином, щоб вони виконували функцію огорожувальних запобіжних конструкцій які скидаються або руйнуються, і якщо належним чином підібрати їхню масу, міцність і спосіб кріплення то тиск і відповідно навантаження на основні конструкції можуть бути зменшені до величин безпечних з умови міцності або несучої здатності основних конструкцій.

На рис. 1 показано напрямки дії вибухової хвилі на запобіжні конструкції при вибуху в середині будівлі. Після руйнування або зміщення ЛСК, щоб не заважати

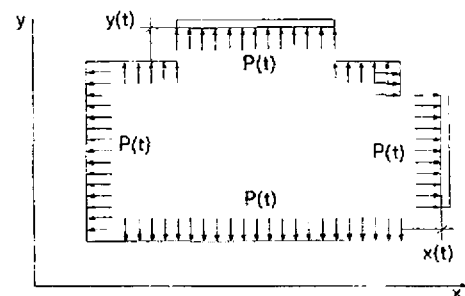


Рис. 1. Схема дії вибухової хвилі на легкоскидаємі конструкції виробничого приміщення

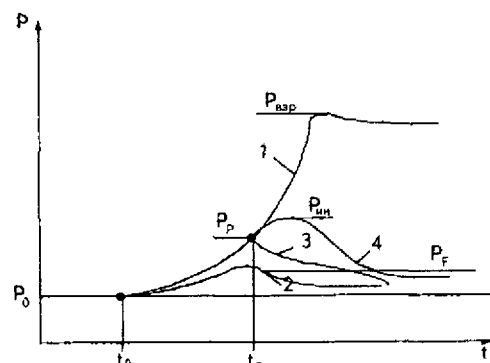


Рис. 2. Характер зміни тиску при вибуху в середині будівлі

вільному витіканню газів, стінова панель або її частини повинні бути відкинуті на деяку відстань від прорізу. На рис. 2. показано характер зміни тиску при вибуху в середині будівлі без та при наявності легкоскидаємих конструкцій. Якщо вибух відбувається в замкнутому об'ємі, наприклад, у закритому приміщенні, міцність стінок якого достатня, щоб витримати максимальний тиск вибуху, то тиск на стіни приміщення буде змінюватись відповідно кривій 1.

Якщо вибух відбувається в напівзамкнутому об'ємі, тобто у приміщенні є отвір, відкритий в момент запалення суміші, то зміна тиску буде відповідати кривій 2. При цьому максимальний тиск буде залежати від площі отвору і може бути значно менше, чим максимальний тиск, що має місце в замкнутому об'ємі. При вибуху в приміщенні з отвором, закритим конструкціями, що легко скидаються тиск на стінки в початковий момент буде відповідати кривій, такий як у замкнутому об'ємі, до значення P_p , що відповідає початку руйнування легкоскидаємої конструкції. Потім, коли відбувається швидко розкриття отвору, тиск від P_p зменшується за законом, що відповідає кривій 3 і максимальний тиск, при досить великій площі отвору, не перевищуватиме P_p . Враховуючи що легкоскидаємі конструкції масивні і відповідно інерційні, за час її переміщення від отвору на таку відстань, щоб вона не перешкождала витіканню газів через отвір, зміна тиску буде відбуватися по більш складній залежності, що відповідає кривій 4 з максимальним значенням тиску p залежної від ступеня інерційності, швидкості зміщення або руйнування ЛСК. При розрахунку і проектуванні легкоскидаємих конструкцій завдання полягає у встановленні таких площей отворів (прорізів) і характеристик ЛСК — маси і міцності, щоб виконувалася умова $P_p < P_{*op}$.

Враховуючи можливість руйнування поруч стоячих об'єктів було визначено траєкторію руху ЛСК або її частини після відокремлення від будівлі. ЛСК може бути зруйнована на окремі частини — осколки, які розлітаються під різними кутами. Під дією вибухової хвилі їм надається початкова швидкість V_0 і напрямком польоту визначається кутом α .

На осколок або плиту під час польоту буде діяти наступні сили: тяжіння mg ; лобового опору $F_d =$

$$= \frac{C_d \rho v^2 A_d}{r}; \text{ під'ємна } F_n = \frac{C_n \rho v^2 A_n}{r}. \text{ В цих рівняннях } m —$$

маса осколка; $g — 9,8 \text{ м/с}^2$; C_n і C_d — експериментальні коефіцієнти лобового опору і під'ємної сили залежно від форми тіла і його орієнтації відносно вектора швидкості v . $A —$ ефективна площа осколка — плити. В інженерних розрахунках для осколків приймається $A_n = A_p = A$.

Для розрахунку зони безпеки спираючись на результати аналітичних досліджень [4] можна вважати, що осколок — плита рухається в одній площині тоді рівняння руху запишемо.

В проекції на вісь (горизонтальний напрямок)

$$-m \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) - \frac{1}{2} AC_d \rho \left[\left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} y(t) \right)^2 \right] \cos(\alpha) - \frac{1}{2} AC_n \rho \left[\left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} y(t) \right)^2 \right] \sin(\alpha) = 0 \quad (1)$$

і відповідно на вісь (вертикальний напрямок)

$$-mg - m \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) - \frac{1}{2} AC_d \rho \left[\left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} y(t) \right)^2 \right] \times \sin(\alpha) + \frac{1}{2} AC_n \rho \left[\left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} y(t) \right)^2 \right] \cos(\alpha) = 0 \quad (2)$$

Швидкість руху осколка — плити у напрямку осей і буде

$$\frac{d}{dt} x(t) = V_{ox} = V_0 \cos(\alpha) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} y(t) = V_{oy} = V_0 \sin(\alpha) \quad (4)$$

де V_0 — початкова швидкість; α — кут між вектром початкової швидкості і віссю x .

Якщо необхідно визначити дальність польоту, тоді, врахувавши, що $V_x = \frac{d}{dt} x(t) \frac{1}{\cos(\alpha)}$, підставимо рівняння (4) у рівняння (1).

$$-m \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) - \frac{1}{2} AC_n \rho \left[\tan(\alpha)^2 \left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^2 \right] \times \sin(\alpha) - \frac{1}{2} AC_d \rho \left[\tan(\alpha)^2 \left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^2 \right] \cos(\alpha) = 0 \quad (5)$$

З рівняння (5) знайдемо відстань $x(t)$, яку пролетить осколок за час t , його швидкість і прискорення.

Для цього спочатку знайдемо його розв'язок рівняння (5) у загальному виді

$$x(t) = 2m \ln \left(\frac{1}{2} A \rho (C_1 \tan(\alpha) + C_2 \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_3 \sin(\alpha) + C_4 \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_5 \cos(\alpha)) / (A \rho (C_1 \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_2 \sin(\alpha) + C_3 \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_4 \cos(\alpha))) \right) \quad (6)$$

Враховавши початкові умови, знайдемо стали інтегрування C_1 і C_2 . При $t = 0 \Rightarrow x(t) = 0 \Rightarrow \frac{dx}{dt} = V_{ox}$ маємо дальність польоту

$$x(t) = 2m \ln \left(\frac{1}{2} (V_{ox} t A \rho C_n \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} t A \rho C_d \sin(\alpha) + V_{ox} t A \rho C_d \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} t A \rho C_d \cos(\alpha) + 2m) / (A \rho (C_n \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_n \sin(\alpha) + C_d \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_d \cos(\alpha))) \right) \quad (7)$$

Використавши комп'ютерні методи символної математики спростимо рівняння (7)

$$x(t) = \frac{2m \cos(\alpha)^2 + V_{ox} t A \rho C_n \sin(\alpha) + 2m \ln \left(2 - \ln \left(\frac{V_{ox} t A \rho C_d \cos(\alpha)}{m \cos(\alpha)^2} \right) \right) \cos(\alpha)^2}{A \rho (C_n \sin(\alpha) + C_n \cos(\alpha))} \quad (8)$$

Виконавши диференціювання функції $x(t)$, знайдемо швидкість руху плити — осколка.

$$v(t) := \frac{d}{dt} x(t) = 2m (V_{ox} A \rho C_n \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} A \rho C_n \sin(\alpha) + V_{ox} A \rho C_d \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} A \rho C_d \cos(\alpha)) / ((V_{ox} t A \rho C_n \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} t A \rho C_d \sin(\alpha) + V_{ox} t A \rho C_d \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} t A \rho C_d \cos(\alpha) + 2m)$$

$$+ V_{ox} t A \rho C_d \cos(\alpha) + 2m) A \rho (C_n \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_n \sin(\alpha) + C_d \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_d \cos(\alpha)) \quad (9)$$

$$(\sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + \sin(\alpha) + \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + \cos(\alpha))$$

і прискорення

$$v(t) := \frac{d^2}{dt^2} x(t) = 2m(V_{ox} A \rho C_n \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} A \rho C_n \sin(\alpha) + V_{ox} A \rho C_d \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} A \rho C_d \cos(\alpha)) / ((V_{ox} t A \rho C_n \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} t A \rho C_n \sin(\alpha) + V_{ox} t A \rho C_d \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} t A \rho C_d \cos(\alpha) + 2m) A \rho (C_n \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_n \sin(\alpha) + C_d \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_d \cos(\alpha))) \quad (10)$$

$$(\sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + \sin(\alpha) + \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + \cos(\alpha))$$

Після спрощення рівняння (9) і (10), відповідно маємо

$$\frac{d}{dt} x(t) = \frac{2m V_{ox} \cos(\alpha)^2}{2m \cos(\alpha)^2 + V_{ox} t A \rho C_n \sin(\alpha) + V_{ox} t A \rho C_n \cos(\alpha)} \quad (11)$$

$$a := \frac{d^2}{dt^2} x(t) = -2m A \rho (C_n \sin(\alpha) + C_d \cos(\alpha)) V_{ox}^2 \cos(\alpha)^2 / (4 \sin(\alpha) V_{ox} t A \rho C_d \cos(\alpha)^2 + 2 \sin(\alpha) V_{ox}^2 t^2 A^2 \rho^2 C_n C_d \cos(\alpha) + 4m^2 \cos(\alpha)^4 + V_{ox}^2 t^2 A^2 \rho^2 C_n^2 - V_{ox}^2 t^2 A^2 \rho^2 C_n^2 \cos(\alpha)^2 + 4m \cos(\alpha)^3 V_{ox} t A \rho C_d + V_{ox}^2 t^2 A^2 \rho^2 C_d^2 \cos(\alpha)^2) \quad (12)$$

Якщо у подальшому в розрахунках міцності поруч стоячих об'єктів, плита чи осколок потрапляють в них, треба враховувати, у залежності від прийнятої методики розрахунку, імпульс сили, який дорівнює $m \frac{d}{dt} x(t)$, тоді треба використовувати рівняння (11), а якщо силу удару $m \frac{d^2}{dt^2} x(t) = ma(t)$, тоді прискорення з рівняння (12).

Для тіл, які мають не плоску форму наприклад наближену до сферичної, тоді можна вважати $C_n = 0$, тобто під'ємною силою знехтувати, і рівняння (1) записати

$$-m \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) - \frac{1}{2} A C_d \rho (\tan(\alpha)^2 \left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^2) \cos(\alpha) = 0. \quad (13)$$

Аналогічно, як це робили у попередньому випадку, отримаємо його розв'язок у загальному виді

$$x(t) = \frac{2m \ln \left(\frac{1}{2} \frac{V_{ox} t A \rho C_d \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} t A \rho C_d \cos(\alpha) + 2m}{m} \right)}{A C_d \rho (\tan(\alpha)^2 + 1) \cos(\alpha)}. \quad (14)$$

Розв'язок рівняння (13) запишемо у вигляді полінома другої степені

$$x(t) = x(0) + D(x)(0)t - \frac{1}{4} \frac{A C_d \rho D(x)(0)^2 (\tan(\alpha)^2 + 1) \cos(\alpha)}{m} t^2. \quad (15)$$

Враховавши початкові умови $t = 0 \Rightarrow x(t) = 0 \Rightarrow \frac{dx}{dt} = V_{ox}$, знайдемо сталі інтегрування C_1 і C_2 і перепишемо рівняння (14).

$$x(t) = \frac{V_{ox} t A C_d \rho \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + 2m \ln \left(\frac{1}{2} \frac{V_{ox} t A C_d \rho \cos(\alpha) + 2m}{m} \right)}{A C_d \rho (\tan(\alpha)^2 + 1) \cos(\alpha)} \quad (16)$$

Після спрощення, використавши команду «Simplify» системи символічної комп'ютерної математики «Maiple», маємо

$$x(t) = - \frac{2m (\ln(2) - \ln \left(\frac{2m \cos(\alpha) + V_{ox} t A C_d \rho}{m \cos(\alpha)} \right)) \cos(\alpha)}{\rho C_d A} \quad (17)$$

і відповідно для полінома другої степені

$$x(t) = V_{ox} t - \frac{1}{4} \frac{A C_d \rho V_{ox}^2 (\tan(\alpha)^2 + 1) \cos(\alpha)}{m} t^2. \quad (18)$$

Виконавши диференціювання рівняння (16), знайдемо швидкість руху

$$v(t) := \frac{d}{dt} x(t) = \frac{2m (V_{ox} A C_d \rho \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} A C_d \rho \cos(\alpha))}{(V_{ox} t A C_d \rho \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} t A C_d \rho \cos(\alpha) + 2m) A C_d \rho (\tan(\alpha)^2 + 1) \cos(\alpha)} \quad (19)$$

і прискорення після диференціювання рівняння (19)

$$a := \frac{d^2}{dt^2} x(t) = \frac{2m (V_{ox} A C_d \rho \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} A C_d \rho \cos(\alpha))^2}{(V_{ox} t A C_d \rho \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + V_{ox} t A C_d \rho \cos(\alpha) + 2m)^2 A C_d \rho (\tan(\alpha)^2 + 1) \cos(\alpha)} \quad (20)$$

Рівняння (19) і (20) спростимо

$$v := \frac{d}{dt} x(t) = \frac{2m V_{ox} \cos(\alpha)}{2m \cos(\alpha) + V_{ox} t A C_d \rho}; \quad (21)$$

$$a := \frac{d^2}{dt^2} x(t) = \frac{2m A C_d \rho V_{ox}^2 \cos(\alpha)}{4m^2 \cos(\alpha)^2 + 4V_{ox} t A C_d \rho m \cos(\alpha) + V_{ox}^2 t^2 A^2 C_d^2 \rho^2} \quad (22)$$

В інженерних розрахунках при моделюванні польоту осколків після вибуху використовують методику [4], яка передбачає спрощення вище наведеного рівняння (1) шляхом експериментального визначення коефіцієнтів C_n і C_d і їх відношення $K_1 = \frac{C_n}{C_d}$.

Отримаємо розв'язок рівняння у загальному виді

$$x(t) = 2m \ln \left(\frac{1}{2} A \rho (C_1 t K_1 \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_1 t K_1 \sin(\alpha) + C_1 t \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_2 K_1 \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_2 K_1 \sin(\alpha) + C_2 \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + C_2 \cos(\alpha)) / m \right) / (A \rho (K_1 \sin(\alpha) \tan(\alpha)^2 + K_1 \sin(\alpha) + \cos(\alpha) \tan(\alpha)^2 + \cos(\alpha))) \quad (24)$$

$$a := \frac{d^2}{dt^2} x(t) = -2m A \rho (K_1 \sin(\alpha) + \cos(\alpha)) V_{ox}^2 \times \cos(\alpha)^2 / (4 \sin(\alpha) V_{ox} t A \rho K_1 m \cos(\alpha)^2 + 2 \sin(\alpha) V_{ox}^2 t^2 A^2 \rho^2 K_1 \cos(\alpha) + 4m^2 \cos(\alpha)^4 + V_{ox}^2 t^2 A^2 \rho^2 K_1^2 - V_{ox}^2 t^2 A^2 \rho^2 K_1^2 \cos(\alpha)^2 + 4V_{ox} t A \rho \cos(\alpha)^3 m + V_{ox}^2 t^2 A^2 \rho^2 \cos(\alpha)^2) \quad (25)$$

Отримані рівняння дають можливість розрахувати зони безпеки для вибухонебезпечних виробництв, коли утворюються осколки, які мають початкову швидкість

$V_0 \Rightarrow V_{0x} = V_{0x} \frac{1}{\cos \alpha}$. Для плит слід враховувати $A_d \neq A_n$. В цьому випадку будемо мати аналогічні рівняння з коефіцієнтами A_d перед $\cos(\alpha)$ і A_n перед $\sin(\alpha)$.

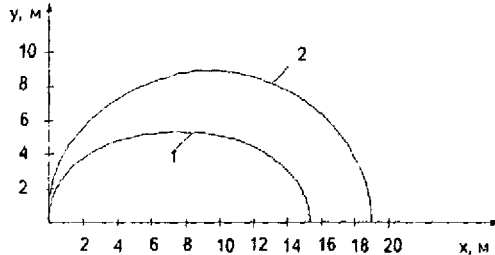


Рис. 3 Траєкторії руху осколків ЛРК
1 — вага 250 кг; 2 — вага 100 кг

На рис. 3 показано розрахункові траєкторії руху осколків плит вагою 250 кг і 100 кг при початковій швидкості руху 20м/с і куті відривання 40°. Значення коефіцієнтів лобового опору C_d і під'ємної сили C_n , а

також ефективні площі A_d і A_n взяті аналогічно розрахункам приведеним в прикладах монографії [1].

Висновки. Аналіз кривих свідчить, що траєкторія руху осколків залежить від потужності вибуху, ваги, форми, кута відриву осколків, сили опору, під'ємної сили повітря та багатьох інших факторів. Для визначення зон безпеки доцільно виконувати розрахунки при умовах, які забезпечують максимальну дальність розлітання осколків. Використані в роботі комп'ютерні методи розрахунку дозволяють це зробити.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Балановский В.Ф.* Актуальні завдання вибухонебезпечки на підприємствах харчових технологій і хлібопродуктів// Харчова промисловість — 1995. — №41. — С. 94–98.
2. *Орлов Г.Г.* Охрана труда в строительстве// М.: Высш. шк., — 1984—343 с.
3. *Пчелинцев В.А., Коптев Д.В., Орлов Г.Г.* Охрана труда в строительстве// М.: Высш. Шк., — 1991. — 272 с.
4. *Взрывные явления. Оценка и последствия.* Кн.2.// Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П., и др.; — М.: Мир, —1986—384 с.

Надійшла до редколегії 01.02.10 р.