

Н.В. Володченко
(Національний університет харчових технологій);
О.Г. Левченко, д-р техн. наук
(Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України)

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РУХУ ЗРАЗКА МАТЕРІАЛУ В ПОВІТРІ ПІД ДІЄЮ ВИБУХОВОЇ ХВИЛІ

Проведений аналіз наукових досліджень процесу впливу повітряної вибухової хвилі (ПВХ), показав, що на даний час не існує повноцінної теорії, яка б відображала фізичну суть процесу, що значно ускладнює отримання якісних математичних моделей і подальшу оптимізацію процесу. Проведені аналітичні дослідження свідчать про те, що отримані результати процесу дії ПВХ на різноманітні зразки матеріалів представлено, в основному, у вигляді емпіричних залежностей, які описують процес для конкретних умов його проведення. Емпіричні залежності не розкривають у повному обсязі механізм процесу. Невирішеним залишається питання переміщення конкретного зразка в повітрі в нормальному і тангенціальному напрямку під час взаємодії з ПВХ. Не існує досконалих, простих у застосуванні методик, за допомогою яких можна дослідити вказане питання і математично описати його закономірності. Необхідність таких досліджень полягає не тільки в визначенні реальних наслідків вибухонебезпечних ситуацій, але й визначити конкретні заходи щодо їх мінімізації. Тому проведено теоретичні та експериментальні дослідження, які дали змогу розробити математичну модель, яка адекватно описує процес переміщення різноманітних зразків матеріалів під час взаємодії з ПВХ для різних умов.

Мета роботи. Для дослідження процесу взаємодії зразків з ПВХ і встановлення його параметрів необхідно розробити відповідну математичну модель, яка описує залежність зусилля взаємодії конкретного матеріалу з ПВХ від швидкості переміщення зразка в повітрі та його властивостей, а саме, напруження тертя між повітрям і зразком по їх контактній поверхні.

Для створення необхідної математичної моделі розглядаємо рух зразку у повітрі під впливом ПВХ [5].

На зразок, під впливом ПВХ, діють зусилля опору руху (рис. 1).

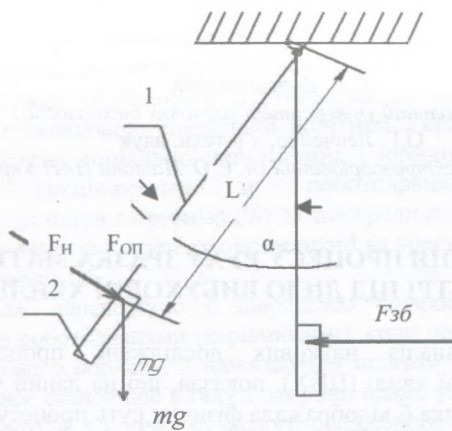


Рис. 1. Схема сил, які діють на зразок: 1 – плече; 2 – зразок, що досліджується; $F_{зб}$ збуджуюча сила; $F_{оп}$ – сила опору;

$F_{и}$ – сила інерції Ньютона; mg – сила тяжіння

При визначенні зусилля тертя G між боковою поверхнею зразка та повітрям, враховуючи його малу величину, коефіцієнти C і k_1 знаходимо за формулою:

$$G = C_{mp} + k_1 V = C_{mp} + k_1 \frac{dy}{dt}, \quad (1)$$

де C_{mp} , H/m^2 – постійний коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу (в нашому випадку властивості матеріалу залежать від його типу та геометричної форми), та питомого навантаження між навколишнім середовищем і боковою поверхнею зразка;

V , m/s – швидкість ковзання між навколишнім середовищем і боковою поверхнею зразка;

k_1 , kg/s – коефіцієнт пропорційності, який враховує вплив швидкості ковзання на зусилля тертя;

y , m – величина переміщення зразка;

t , s – час переміщення зразка.

При взаємодії зразка з повітрям виникає зусилля інерції P_i , яке діє на зразок і має напрям, протилежний напрямку прискорення зразка.

$$P_i = ma = m \frac{d^2 y(t)}{dt^2}, \quad (2)$$

де m – приведена до зразка маса рухомої частини установки (рис. 3); a – прискорення (або сповільнення) зразка при переміщенні його в повітрі.

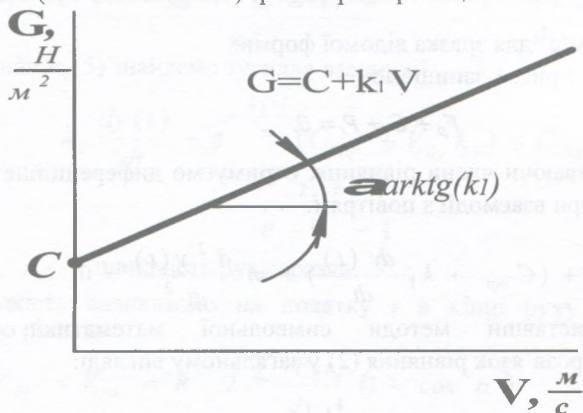


Рис. 2. Схема визначення коефіцієнтів C_{mp} і k_1 .

Схема визначення маси коромисла, прикладеної до точки S зразка, показана на рис. 3.

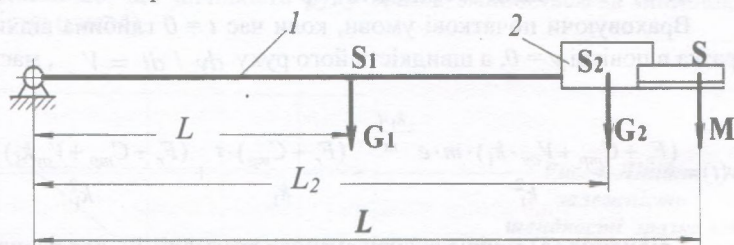


Рис. 3. Схема визначення маси коромисла, приведеної до зразка в тримачі, де 1 – плече коромисла; 2 – зразок в тримачі

Позначення на рис. 3:

S_1, L_1 – центр мас коромисла і відстань до нього від осі обертання;

S_2, L_2 – центр мас зразка з тримачем і відстань до осі обертання,

S – точка приведення маси коромисла на зразка;

G_1, G_2 – зусилля ваги коромисла і зразка в тримачі;

M – маса коромисла, приведена до точки S .

Із рівняння рівноваги:

$$m = \frac{G_1 \cdot l_1 + G_2 \cdot l_2}{g \cdot l}, \text{ кг}, \quad (3)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ для зразка відомої форми.

Згідно з рис. 1 запишемо:

$$F_p + G + P_l = 0. \quad (4)$$

Розкриваючи члени рівняння, отримуємо диференційне рівняння його руху при взаємодії з повітрям:

$$F_r + (C_{mp} + k_1 \frac{dy(t)}{dt}) + m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = 0. \quad (5)$$

Використавши методи символічної математики «Maple», отримаємо розв'язок рівняння (2) у загальному вигляді:

$$y(t) = \frac{C_1 \cdot m \cdot e^{-\frac{k_1 \cdot t}{m}}}{k_1} - \frac{(F_r + C_{mp}) \cdot t}{k_1} + C_2, \quad (6)$$

де C_1 і C_2 – вільні коефіцієнти [4].

Враховуючи початкові умови, коли час $t = 0$ глибина відхилення зразка в повітрі $y = 0$, а швидкість його руху $dy / dt = V_{oy}$, маємо:

$$y(t) = \frac{(F_r + C_{mp} + V_{oy} \cdot k_1) \cdot m \cdot e^{-\frac{k_1 \cdot t}{m}}}{k_1^2} - \frac{(F_r + C_{mp}) \cdot t}{k_1} + \frac{(F_r + C_{mp} + V_{oy} \cdot k_1) \cdot m}{k_1^2} \quad (7)$$

З рівняння (4) можна знайти зусилля взаємодії F_r для різних умов проведення процесу. При цьому виникають значні труднощі, пов'язані з проведенням експерименту, які полягають у тому, що треба фіксувати в часі відстань y відхилення зразку, тобто, знати функціональну залежність $y = f(t)$. За допомогою наявних технічних засобів зробити це можливо, але складно. Для таких досліджень необхідно використовувати спеціальну вимірювальну систему, що дозволяє фіксувати кінетику руху зразка в повітрі. Це значно ускладнить конструкцію експериментальної установки.

Спростимо методику проведення дослідження–визначення зусилля взаємодії F_r . Для цього використаємо рівняння (4).

Продиференціювавши це рівняння, отримаємо:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{(F_r + C_{mp} + V_{oy} \cdot k_1) \cdot e^{-\frac{k_1 \cdot t}{m}}}{k_1^2} - \frac{F_r + C_{mp}}{k_1} \quad (8)$$

З рівняння (5) знайдемо зусилля взаємодії:

$$F_r = \frac{k_1 \frac{dy(t)}{dt} - e^{-\frac{k_1 \cdot t}{m}} (C_{mp} + V_{oy} k_1) + C_{mp}}{e^{-\frac{k_1 \cdot t}{m}} - 1} \quad (9)$$

де dy / dt – швидкість руху зразка.

Швидкість визначаємо на початку і в кінці руху зразка за допомогою рівнянь:

$$V_{oy} = V_{ax} = R \sqrt{2 \frac{\sum P_i r_i}{J} (1 - \cos \alpha)} \quad (10)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = V_{vux} = R \sqrt{2 \frac{\sum P_i r_i}{J} (1 - \cos(\beta + (\alpha - \beta_{втр})))} \quad (11)$$

Приймаємо, що швидкість руху зразка змінюється за лінійною залежністю (рис. 4).

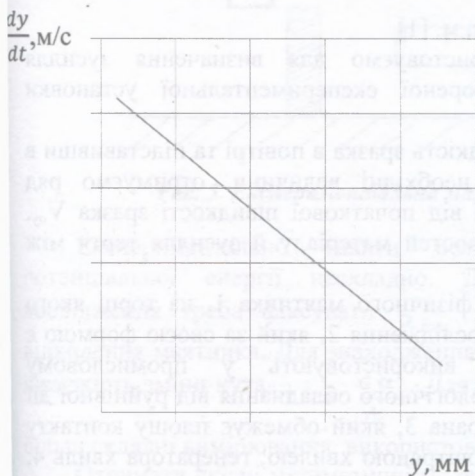


Рис. 4. Лінійна залежність швидкості зразка від глибини відхилення

Знаючи кути відхилення коромисла α і β , розрахунковим шляхом визначимо швидкість руху зразка в декількох проміжних точках.

Знаючи швидкість зразка і час його руху в повітрі, знайдемо:

$$t = \frac{y}{dy/dt}$$

Для визначення зусилля взаємодії в рівнянні (6) не вистачає значення коефіцієнтів C і k_1 . Їх можна знайти, скориставшись методикою [4]. Для цього необхідно провести експериментальні дослідження щодо визначення напруження тертя, за результатами яких отримати залежності коефіцієнтів C і k_1 від властивостей матеріалу та умов процесу взаємодії.

Для порівняння властивостей зразків користуємось питомим зусиллям взаємодії F_r^{num} , яке показує відношення зусилля взаємодії до довжини лінії відхилення h (рис. 1). Згідно з отриманою математичною моделлю, питоме зусилля взаємодії приймає такий вигляд:

$$F_r^{num} = \frac{F_r}{h} = \frac{k_1 \frac{dy(t)}{dt} - e^{-\frac{k_1 \cdot t}{m}} (C_{mp} + V_{oy} k_1) + C_{mp}}{e^{-\frac{k_1 \cdot t}{m}} - 1} \cdot \frac{1}{h}, \quad (13)$$

де h – довжина лінії відхилення, м. [1]

Отриману модель використовуємо для визначення зусилля взаємодії за допомогою створеної експериментальної установки (рис. 5).

Змінюючи початкову швидкість зразка в повітрі та підставивши в отримане рівняння (13) всі необхідні величини, отримуємо ряд залежностей зусилля взаємодії від початкової швидкості зразка V_{oy} , структурно-механічних властивостей матеріалу й зусилля тертя між повітрям і поверхнею зразка.

Установка складається з: фізичного маятника 1, на торці якого закріплено фрагмент об'єкта дослідження 2, який за своєю формою є аналогом конструкції, що використовують у промисловому будівництві і для захисту технологічного обладнання від руйнівної дії вибухової хвилі; захисного екрана 3, який обмежує площу контакту досліджуваного фрагменту з повітряною хвилею; генератора хвиль 4; вимірювального пристрою 5.

Залежно від форми зразка, його поверхні відстані до генератора хвиль енергетичні складові удару W_k і W_p будуть різні. Порівнюючи їх, можна дати рекомендації щодо захисту промислових об'єктів та технологічного обладнання від руйнування.

За умови імпульсного навантаження для визначення енергії удару вибухової повітряної хвилі та відповідно ступеня руйнування об'єкта важливо знайти швидкість руху маятника.

При оцінці руйнівної дії вибухової хвилі виникає необхідність визначення енергії не тільки максимальному значенні кутів α , коли $W_k = 0$ і загальна енергія $W_{\text{заг}} = W_p$, але й в проміжному стані, коли

$$W_{\text{заг}} = W_p + W_k \cdot [2, 3, 6].$$

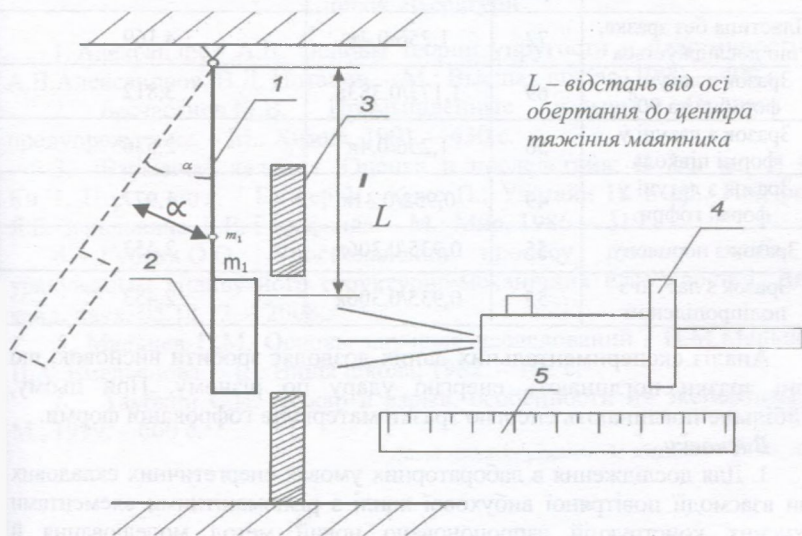


Рис. 5. Експериментальна маятникова установка

Експериментально знайти величину та характер зміни потенціальної енергії нескладно. Для цього за різних умов дослідження треба фіксувати α_{max} – максимальне значення кута відхилення маятника. Для знаходження кінетичної енергії треба знати швидкість зміни кута $\alpha \Rightarrow \frac{d\alpha}{dt}$. Для її знаходження треба провести більш складні вимірювання, використовуючи швидкісну фотозйомку.

Отримати якісні математичні моделі можливо, якщо аналітичним шляхом визначити закономірність зміни кута α і швидкість $\frac{d\alpha}{dt}$ відхилення плеча маятника при різних умовах дії рушійної сили –

силового імпульсу ударної повітряної хвилі – форми стану та структурно-механічних властивостях досліджуваного зразка.

Після проведення експериментальних досліджень було отримано результати щодо величини потенційної енергії для різних зразків, наведених у таблиці 1.

Таблиця 1

Величина потенційної енергії

Зразок дослідження	α , град	α , рад	$W_p = mgL(1 - \cos \alpha)$
Пластина без зразка, що досліджується	72	1,256/0,4 π	4,169
Зразок з латуні у формі кута 90 ⁰	69	1,173/0,383 π	3,812
Зразок з латуні у формі півкола	56	1,256/0,4 π	2,536
Зразок з латуні у формі гофри	49	0,952/0,31 π	1,977
Зразок з поролону	55	0,935/0,306 π	2,453
Зразок з латуні з поліпропіленом	55	0,935/0,306 π	2,453

Аналіз експериментальних даних дозволяє зробити висновок, що різні зразки поглинають енергію удару по різному. При цьому, найбільше поглинають енергію зразки матеріалів гофрованої форми.

Висновки

1. Для дослідження в лабораторних умовах енергетичних складових при взаємодії повітряної вибухової хвилі з різноманітними елементами захисних конструкцій запропоновано новий метод моделювання й експериментальна установка для дослідження механізму удару.

2. Проведено математичне моделювання руху зразка в повітрі під час взаємодії з ПВХ. В результаті отримано математичну модель для визначення зусилля взаємодії залежно від швидкості зразку в повітрі та структурно-механічних властивостей матеріалу.

3. Математична модель дає змогу досліджувати, встановлювати параметри процесу взаємодії зразків з ПВХ з метою його удосконалення, значно зменшивши при цьому витрати на проведення фізичних експериментів.

4. Застосовано модель для визначення зусилля взаємодії зразку з повітрям за допомогою створених у роботі експериментальних установок та відповідних їм методик досліджень. Для визначення числових величин структурно-механічних властивостей матеріалу, які входять до математичної моделі, необхідно провести додаткові дослідження.

5. Досвід застосування в роботі розробленої математичної моделі для визначення зусиль взаємодії зразків з ПВХ обґрунтовує ефективність використання диференціальних рівнянь руху для моделювання й оптимізації взаємодії різноманітних зразків матеріалів у повітрі під тиском повітряної вибухової хвилі.

6. Аналіз експериментальних даних показав, що різні зразки поглинають енергію удару по-різному. При цьому найбільше поглинають енергію зразки матеріалів гофрованої форми.

Список літератури

1. Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В.Александров, В.Д. Потапов. – М.: Высшая школа, 1990. – 400 с.
2. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. – М.: Химия, 1991. – 430 с.
3. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. В 40 Кн. 1. Пер. с англ. / Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др.; Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. – М.: Мир, 1986. – 319 с.
4. Губеня О.О. Удосконалення процесу різання хліба з урахуванням впливу його структурно-механічних властивостей: Дис. канд. наук: 05.18.12. – 2008.
5. Мальцев П.М. Основы научных исследований / П.М.Мальцев, Н.А. Емельянова. – К.: Вища школа, 1982. – 192 с.
6. Таубкин С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. – М., 1999. – 600 с.

Дата подання статті до збірника – 25.06.2012