

УДК 539.34

ПРО МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СЕЙСМОВИБУХОВИХ ХВИЛЬ

Ісаєв В. Ф.¹, Пальчик С. С.¹

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація: Дія вибухів на споруду в випадку, коли вони не відбуваються безпосередньо біля будівлі, передається через повітряну та ґрунтову хвилі. Ґрунтову хвилю будемо називати сейсмовибуховою хвилею. Повітряна хвиля діє, головним чином, на елементи будівлі, що знаходяться над землею. А сейсмовибухова хвиля впливає безпосередньо на підземні елементи споруди. Сейсмовибухова хвиля може викликати суттєві зміщення та привести до додаткових напружень в верхніх конструкціях будівлі.

Досвід дослідження вражених об'єктів доводить, що в багатьох випадках, руйнування споруд відбувається через дію сейсмовибухових хвиль. Спостерігались випадки, коли саме через ґрунт передавались хвилі, які руйнували всю будівлю: і фундамент, і надземну частину.

Практичний інтерес до вивчення питань утворення та поширення сейсмовибухових хвиль не вичерпується вибухами авіабомб, ракет чи артилерійських снарядів. На практиці промислові вибухи проводяться на таких глибинах, що повітряна хвиля дуже слабка, вибухів майже не чути. Від місця вибуху поширюються сейсмовибухові хвилі і, тому вплив на споруди завдають саме вони.

Аналізуючи наслідки вибухів під час аварій на транспортних газопроводах, природно звернутись до результатів вивчення дії вибухів з застосуванням вибухових величин. Математична модель в такому випадку зводиться до вивчення алгебраїчного рівняння четвертого степеня. Одним із розв'язків цього рівняння є радіуси безпечної дії. В якості трьох коефіцієнтів даного рівняння виступають величини, що характеризують застосовану вибухову речовину та її кількість. Переходячи до розгляду вибухів на газотранспортних системах для цих коефіцієнтів необхідно знайти інші характеристики, пов'язані з процесами, які відбуваються під час таких вибухів. Для створення таких моделей в роботі вивчені обмеження, які накладаються на ці коефіцієнти властивостями існування певних розв'язків алгебраїчного рівняння четвертого порядку.

Ключові слова: сейсмовибухова хвиля, промислові аварії, газотранспортні системи.

ON A MODEL OF SEISMIC-EXPLOSIVE WAVE PROPAGATION

V. Isaiev¹, S. Palchyk¹

¹Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract: When an explosion occurs at some distance from a structure, its impact is transmitted through air and ground waves. The ground wave, referred to in this study as a seismic-explosive wave, primarily affects the underground elements of a structure, while the air wave mainly acts on above-ground components. Seismic-explosive waves can cause significant ground displacements and generate additional stresses in the superstructure.

Investigations of damaged facilities show that in many cases structural failure is caused mainly by seismic-explosive waves. In some events, waves propagating through the soil have led to the complete destruction of buildings, including both foundations and above-ground parts.

The study of seismic-explosive wave generation and propagation is important not only for military explosions but also for industrial and technological accidents. Industrial explosions often occur at depths where the air wave is weak or barely perceptible, while seismic-explosive waves remain the dominant damaging factor for nearby structures.



To analyse explosions associated with accidents in gas transportation systems, mathematical models traditionally used for explosive charges are considered. In this approach, the problem is reduced to the analysis of a fourth-degree algebraic equation, one of whose solutions defines the radius of safe action. For conventional explosives, the coefficients of this equation depend on the type and quantity of the explosive. For explosions in gas transportation systems, these coefficients must be redefined using parameters that describe the physical processes occurring during such events. The paper examines the constraints on these coefficients imposed by the conditions for the existence of physically meaningful solutions of the fourth-order equation.

Keywords: seismic–explosive wave, industrial accidents, gas transportation systems.

1 ВСТУП

Дія авіабомб на споруду в випадку, коли вони не влучають безпосередньо, передається через повітряну та ґрунтову хвилю. Ґрунтову хвилю будемо називати сейсмовибуховою хвилею. Повітряна хвиля діє, головним чином, на елементи будівлі, що знаходяться над землею. А сейсмовибухова хвиля впливає безпосередньо на підземні елементи споруди. Сейсмовибухова хвиля може викликати суттєві зміщення та привести до додаткових напружень в верхніх конструкціях будівлі.

Досвід дослідження вражених об'єктів доводить, що в багатьох випадках, руйнування споруд відбувається через дію сейсмовибухових хвиль. Спостерігались випадки, коли саме через ґрунт передавались хвилі, які руйнували всю будівлю: і фундамент, і надземну частину.

Практичній інтерес до вивчення питань утворення та поширення сейсмовибухових хвиль не вичерпується вибухами авіабомб, ракет чи артилерійських снарядів. На практиці промислові вибухи проводяться на таких глибинах, що повітряна хвиля дуже слабка, вибухів майже не чути. Від місця вибуху поширюються сейсмовибухові хвилі і, тому вплив на споруди завдають саме вони.

Наведені міркування вказують на актуальність вивчення впливу сейсмовибухових хвиль на споруди.

Існують цілий ряд робіт, в яких приводяться результати експериментів по вивченню даного питання. Побудовані також і теоретичні моделі для вивчення спеціальних властивостей сейсмовибухових хвиль. Ці моделі мають вигляд лінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами або алгебраїчних рівнянь. Аналітичний розв'язок лінійних диференціальних рівнянь, які досить часто зустрічаються в задачах фізики, механіки та техніки, зводиться до знаходження коренів характеристичних многочленів. Необхідність явного вираження коренів через коефіцієнти для якісного аналізу фізичної природи явища виникає і як самостійна задача. Наприклад, при розв'язуванні рівняння Ван-дер-Ваальса виникає алгебраїчне рівняння третього ступеня. Також рівняння третього ступеня виникає в механіці суцільного середовища при вивченні деформацій.

В кожній точці деформованого тіла діють головні напруження, які є коренями кубічного алгебраїчного рівняння. Коефіцієнти цього рівняння не залежать від вибору системи координат і називаються відповідно лінійним, квадратичним та кубічним інваріантами тензора напруження. Головні подовження також є коренями кубічного рівняння, коефіцієнтами якого є інваріанти тензора деформації. Моделювання явищ викликаних дією сейсмовибухових хвиль приводить до алгебраїчних рівнянь четвертого ступеня.

В роботі зроблений аналіз різних найбільш відомих способів розв'язування алгебраїчних рівнянь, враховуючи можливості комп'ютерної реалізації цих способів.

Саме комп'ютерне моделювання сьогодні є заміною для практичних випробувань при вивченні сейсмовибухових хвиль. Комп'ютерні моделі дозволяють оцінити стан споруд та конструкцій після впливу на них сейсмовибухових хвиль. В свою чергу, це дасть можливість прийняти рішення про доцільність відбудови чи ремонту споруд.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Небезпека, яку несуть аварії на газопроводах людству та житловим спорудам, вимагає неперервної турботи щодо надійності трубопроводів, способів їх використання, витривалості вживаних матеріалів. Цієї проблемі приділяється величезна увага вчених, які використовують найсучасніші методи для вивчення факторів, що мають вплив на надійність постачання газу. Хоча вибухи на газопроводах

відбуваються відносно рідко, але наслідки від них мають великий руйнівний характер. Результати дії відчуваються на оточуючих спорудах, промислових об'єктах, а на місці вибуху утворюються кратери. Вивченню місць враження присвячені багато робіт як вітчизняних, так і зарубіжних авторів.

В роботі [1] були описані проведені авторами експерименти на підземних трубопроводах з заданим діаметром отвору витоку. Ними були вивчені характеристики витоку за різних тисків у трубопроводі, напрямків витоку та властивостей ґрунту, і запропонували метод оцінки ризику аварійних витоків.

В статті [2] процес конвекційної дифузії природного газу в ґрунті був розділений на чотири етапи. Автори роботи [3] вивчали закони дифузії природного газу в ґрунті та обмежених просторах за допомогою експериментів, проаналізувавши функціональний зв'язок між обсягом витоку в сусідніх обмежених просторах та відстанню від центральної точки витоку.

Технологія чисельного моделювання широко застосовується в дослідженні витоку газу. В роботах [4, 5] була побудована чисельна модель для витоків з неглибоко заглиблених трубопроводів і вивчено взаємозв'язок між концентрацією, швидкістю та часом з урахуванням впливу діаметра перфорації на дифузію.

Автори робіт [6, 7, 8] запропонували модель прогнозування дифузії природного газу в ґрунті шляхом аналізу впливу таких параметрів, як відстань витоку природного газу, кількість витоку та час на розподіл концентрації природного газу в ґрунті. В статті [9] були проведені чисельні дослідження витоку з неглибоко заглибленого трубопроводу та запропонували формулу для розрахунку межі небезпеки для аварій з витоком з заглибленого трубопроводу.

В роботі Лавріка В.Е. та Булабуцького Ю.О. [10] в імпульсно-гідродинамічній постановці розглянуто дію вибуху подовженого заряду, розміщеного вздовж дна та стінок прямокутної траншеї.

Існуючі дослідження мають декілька обмежень у розкритті механізмів витоку газу та його дифузії в ґрунті, а створені моделі є недостатніми для опису прогнозування розподілу концентрації під впливом декількох факторів.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є вивчення явища вибуху, який викликає деформацію елементів споруд в результаті дії сейсмовибухових хвиль, за допомогою моделювання процесу в середовищі місця вибуху. В якості базової моделі використовується модель розповсюдження сейсмовибухових хвиль при використанні вибухівки. Задача дослідження: оцінити можливі значення параметрів для отримання коренів в необхідній кількості і з наперед заданими властивостями.

Зони впливу сейсмовибухових хвиль. При вибуху в твердому середовищі утворюються три зони впливу сейсмовибухової хвилі на середовище:

- 1) зона стиску;
- 2) зона руйнувань;
- 3) зона струсів (пружних деформацій).



Рис.1. Кратер, що спричинив вибух

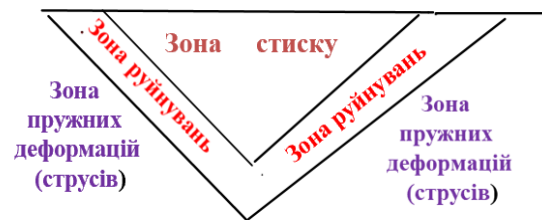


Рис.2. Зони впливу сейсмовибухових хвиль

Зона стиску – це область, в якій речовина середовища перетворюється на пил чи уламки, або шматки, що викидаються із області руйнувань вибуховою газовою хвилею. При вибуху поблизу вільної поверхні зони стиску - це воронка, розміри якої залежать від властивостей та ваги вибухової речовини, а також від властивостей середовища, в якому відбувся вибух та віддалення центра вибуху від поверхні. При зміні глибини вибуху характер руйнувань змінюється. Якщо глибина залягання така, що воронка не утворюється, то зона стиску називається камуфлетою.

За зоною стиску знаходиться зона руйнувань. В середині цієї зони вибухова хвиля викликає появу тріщин і тому її ще називають зоною тріщиноутворення.

Далі йде зона, де вибухова хвиля викликає лише пружні деформації середовища. Її ще називають зоною струсів.

Якщо припустити, що руйнування матеріалу середовища при дії вибуху відбувається в зоні з густиною енергії більшою чи рівною деякому критичному значенню і, крім того припустити, що густина енергії вибуху обернено пропорційна об'єму фронту вибухової дії, то можна переконатися в справедливості наступного твердження.

Теорема 1. Радіуси зон стиску і руйнувань пропорційні кореню кубічному із ваги заряду.

Доведення.

На основі зроблених припущень можемо записати

$$E_k v = W = const. \quad (1)$$

Тут E_k – критичне значення густини енергії вибуху, що відповідає руйнуванню середовища; v – об'єм зони стиску чи руйнувань; W – енергія вибуху з урахуванням коефіцієнта корисної дії.

Величина W може бути прийнятою пропорційною вазі вибухової речовини

$$W = k_1 q.$$

Якщо об'єм зони стиску – це нормальна воронка викиду, то

$$v = \frac{1}{3} \pi R^3,$$

де R – радіус зони стиску чи руйнувань.

Якщо підставити останнє в (1), то отримаємо, що

$$R = k_0 \sqrt[3]{q}, \text{ де } k_0^1 = \sqrt[3]{\frac{3k_1}{\pi E_k h_1}}, k_0 = \sqrt[3]{\frac{3k_1}{\pi E_k}}. \quad (2)$$

Коефіцієнт k_0 залежить від властивостей вибухової речовини, які визначаються коефіцієнтом k_1 та E_k – густиною енергії, при якій відбуваються руйнування.

Таким чином, теорему доведено.

Формула (2) називається формулою Лебрена.

При глибині закладання заряду менше камуфлетної воронка має форму конуса, у якого радіус не дорівнює висоті. Тому для більш загального випадку формулу (2) записують в виді

$$R = k_0^1 \sqrt[3]{q}, \text{ де } k_0^1 = \sqrt[3]{\frac{3k_1}{\pi E_k h_1}}.$$

Тут h_1 глибина залягання заряду.

Формула Лебрена для нормального заряду може бути записана в виді $q = 1,83\mu h^3$.

Тут h – глибина воронки, μ – коефіцієнт, який дорівнює кількості вибухової речовини, необхідної для викиду одиниці середовища.

Зона стиску, що характеризується радіусом воронки, є зоною, в якій споруди руйнуються. За зоною стиску йде зона руйнувань, або тріщини утворень. Її радіус в залежності від типу будівель та інших характеристик середовища в 2-4 рази більше зони стиску.

Третя зона впливу вибуху – це зона струсів, яка характеризується тим, що в середині цієї зони відбуваються пружні деформації. Теоретично радіус цієї зони дорівнює нескінченності, але з практичної точки зору до зони струсів відносять зону, де відбуваються небезпечні для споруд та їх конструктивних елементів пружні деформації.

Для оцінки небезпеки вибухів для споруд необхідно визначити віддалення від місця вибуху, при якому швидкість коливань ґрунту не перевищує допустиму величину. Ця відстань називається радіусом безпечної дії вибуху.

Радіус безпечної дії дорівнює сумі радіусів трьох зон впливу вибуху і може бути знайдений з наступної рівності

$$\frac{1}{R^2} + \frac{c_1}{R} + \frac{c_2}{\sqrt{R}} + c_3 = 0, \quad (3)$$

де R – радіус безпечної дії, c_1, c_2 – деякі сталі, $c_3 = -\frac{v_\delta}{\omega \rho \sqrt{q}}$, v_δ – допустимі значення

коливань ґрунту, ρ – коефіцієнт пропорційності, ω – частота вибухових хвиль. Якщо

зробити в рівнянні (3) заміну $x = \frac{1}{\sqrt{R}}$, то ми отримаємо рівняння

$$x^4 + Ax^2 + Bx + C = 0, \quad (4)$$

тут $A = c_1$, $B = c_2$, $C = c_3$, причому виходячи з умов дослідження $C < 0$.

Далі ми займемося вивченням розв'язків рівняння (4).

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглянемо рівняння n -го степеня, яке має вид:

$$a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_{n-1} x + a_n = 0, \quad a_0 \neq 0. \quad (5)$$

При $n \geq 5$ в загальному виді рівняння (5) не має розв'язків в радикалах. Це твердження є змістом теореми Абеля. Воно справедливе і для багатьох інших функцій крім радикалів, зокрема для всіх однозначних аналітичних функцій, таких, як e^z та $\sin z$. Але рівняння (5) при $n=5$ розв'язується за допомогою еліптичних модуль функцій. Існують числові розв'язки та чисельні методи розв'язання для рівнянь спеціального виду. Ми проведемо порівняльний аналіз розв'язків рівнянь при $n=4$ з урахуванням можливостей комп'ютерної реалізації та застосування для розв'язання рівняння (4).

Рівняння четвертого степеня $z^4 + az^3 + bz^2 + cz + d = 0$ з дійсними коефіцієнтами a, b, c, d заміною $z = x - \frac{a}{4}$ приводиться до рівняння

$$x^4 + px^2 + qx + r = 0. \quad (6)$$

$$\text{Тут } p = b - \frac{3a^2}{8}; \quad q = c - \frac{ab}{2}; \quad r = d - \frac{ac}{4} + \frac{a^2 b}{16} - \frac{3a^4}{256}.$$

Рівняння (6) будемо називати канонічним за умови $r \neq 0$.

Розглянемо питання про розподіл та кратність дійсних коренів канонічного рівняння. Для цього рівняння (6) запишемо в виді $q = -\frac{r}{x} - px - x^3$ та вивчимо графік функції

$$q(x) = -\frac{r}{x} - px - x^3. \quad (7)$$

Очевидно, що ця функція є непарною. Знайдемо її похідну

$$q'(x) = \frac{r}{x^2} - p - 3x^2 = \frac{(r - px^2 - 3x^4)}{x^2}.$$

Точки, в яких ця похідна дорівнює нулю, знайдемо, розв'язавши бікватратне рівняння $(x^2)_{1,2} = \frac{-p \pm \sqrt{p^2 + 12r}}{6}$.

Отже, лише ці значення x можуть бути кратними коренями канонічного рівняння.

В залежності від значень p та $r \neq 0$ графік функції (7) має один з шести принципово різних видів. Користуючись графіком, легко визначити число додатних та від'ємних коренів рівняння (6) в залежності від значень коефіцієнтів p та $r \neq 0$.

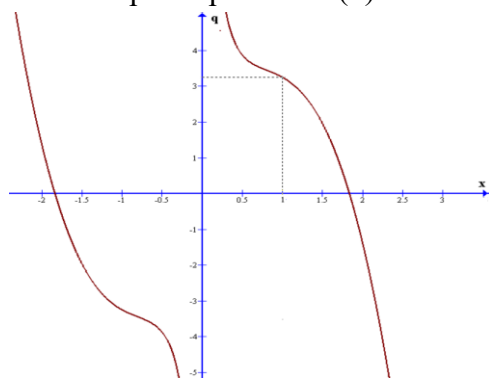


Рис.1. $p < 0, r < -\frac{p^2}{12}$, або $p \geq 0, r < 0$.

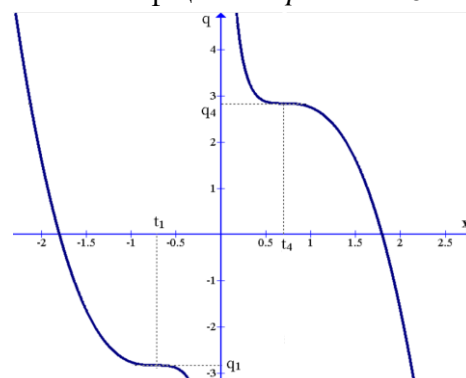


Рис.2. $p < 0, r = -\frac{p^2}{12}$

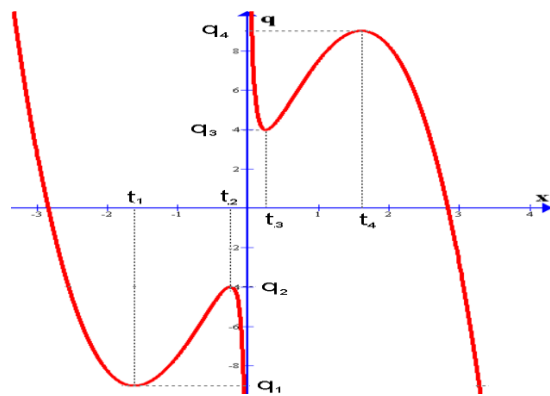


Рис.3. $p < 0, -\frac{p^2}{12} < r < 0$

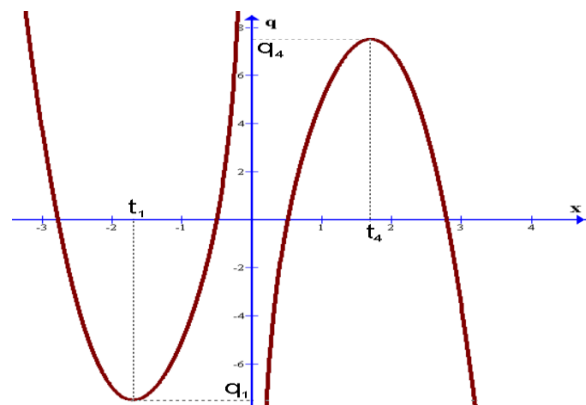


Рис.4. $p < 0, 0 < r < \frac{p^2}{4}$

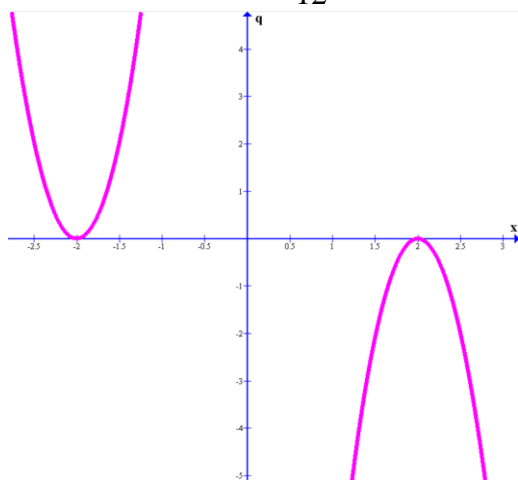


Рис.5. $p < 0, r = \frac{p^2}{4}$

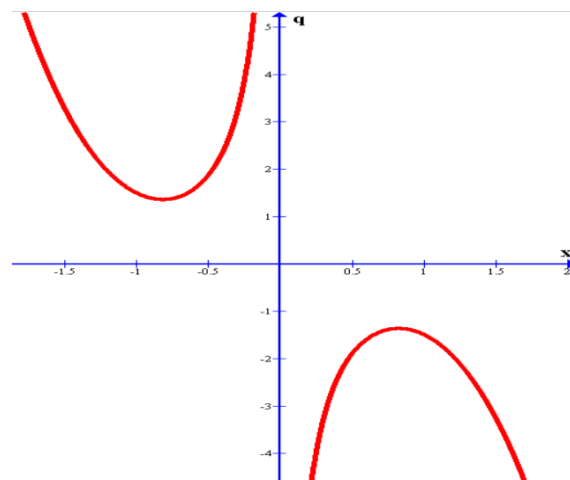


Рис.6. $p < 0, r > \frac{p^2}{4}$ або $p \geq 0, r > 0$

Враховуючи особливості рівняння (4), а саме, від'ємність вільного члена, можемо сформулювати наступну теорему.

Теорема 2. Для розв'язків рівняння (4) можливі випадки 1, 2, 3.

Зауважимо, що у випадку $p \geq 0, r < 0$ має місце випадок 1. Також випадок 1 відповідає умовам $p < 0$, а $r < -\frac{p^2}{12}$. Досліджуючи графік першого випадку приходимо до висновку, що рівняння (6) має два дійсних різних кореня та два комплексно-спряжених.

Якщо $p < 0$, а $r = -\frac{p^2}{12}$ (випадок 2), розрахунки дають наступні співвідношення:

$$x_{1,2,3} = \sqrt{-\frac{p}{6}} \text{ при } q = \sqrt{-\frac{8p^3}{27}}, \text{ або } x_{1,2,3} = -\sqrt{-\frac{p}{6}} \text{ при } q = -\sqrt{-\frac{8p^3}{27}}.$$

Тобто трикратний корінь і ще один дійсний.

Якщо $p < 0, -\frac{p^2}{12} < r < 0$, то графік функції $q(x)$ має вигляд, зображений на рис.

3, а координати її екстремумів наступні:

$$t_{1,4} = \mp \sqrt{\frac{-p + \sqrt{p^2 + 12r}}{6}}, \quad t_{2,3} = \mp \sqrt{\frac{-p - \sqrt{p^2 + 12r}}{6}}$$

Розглянемо функцію $q_i = q(t_i)$, $i = \overline{1,4}$.

Тоді в залежності від значень q можливі три випадки:

- 1) Якщо $q \in (-\infty, q_1) \cup (q_2, q_3) \cup (q_4, +\infty)$, то рівняння має два дійсні та два комплексно-спряжені кореня.
- 2) Якщо $q \in (q_1, q_2) \cup (q_3, q_4)$, то рівняння має три різні дійсні кореня.
- 3) Якщо $q = q_i$, то рівняння має чотири дійсні корені, причому при $x = t_i$ корінь буде двократним.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Таким чином, використання встановлених закономірностей дозволяє формалізувати параметри, що входять до рівняння (6), у вигляді функцій, які безпосередньо пов'язані з наслідками реальних промислових вибухів. Це створює основу для інженерної оцінки руйнівної дії вибуху на підставі легко вимірюваних польових характеристик, таких як глибина та діаметр кратера або об'єм утвореної камуфлетної порожнини. Подібний підхід значно спрощує процедуру постфактум-аналізу аварійних ситуацій і забезпечує можливість верифікації розрахункових моделей за емпіричними даними.

Особливий інтерес становить встановлення кількісного зв'язку між геометричними параметрами кратера (або камуфлети) та енергетичними характеристиками вибуху, зокрема — еквівалентною масою тротилу та питомою енергією заряду. Така кореляція дозволяє не лише реконструювати параметри вибухового навантаження за слідами на місцевості, але й прогнозувати можливі наслідки при плануванні безпечних відстаней або проектуванні захисних споруд. У подальшому це може бути покладено в основу нормативних методик оцінки ризиків, пов'язаних із вибухонебезпечними об'єктами.

6 ВИСНОВКИ

Таким чином, використовуючи оцінювані закономірності отримаємо можливість описати параметри, які входять в рівняння (6) так, щоб прив'язати їх до реальних наслідків промислових вибухів. Зокрема, цікавим є пошук взаємозв'язку між фізичними розмірами кратера на місті вибуху або розмірами камуфлети.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Houssin-Agbomson D., Blanchetière G., Mccollum D. et. al. Consequences of a 12-mm diameter high pressure gas release on a buried pipeline. Experimental setup and results [J]. /D. Houssin-Agbomson, G. Blanchetière, D. Mccollum// J Loss Prev Process Ind. 2018. 54:183–9.
2. Xie Yu., Wu Z. et al. Experimental Study on the diffusion of Pipeline natural gas leakage in soil [J]/ Yu. Xie, Z. Wu et.al. // China Safety Sci J. 2012. 8(04): 13–7.
3. Junbao X., Xiaomei H., Zhiwei L. et. al. Experimental study on the leakage flow and diffusion law of buried gas pipeline [J]. \ X. Junbao, H. Xiaomei, L. Zhiwei et. al. \ \ Gas & Heat. 2016. 36(06):36–42.

4. Cui J., Ma S., Liang Y. et. al. Numerical simulation of perforation caused leakage diffusion of buried gas pipelines [J]. \ J. Cui, S. Ma, Y. Liang et. al. \ Appl Mechan Mat. 2014. 509:135–40.
5. Xinhong L., Jie M., Hans P., Renren Z. Dynamic risk investigation of urban natural gas pipeline accidents using Stochastic Petri net approach. \L. Xinhong, M. Jie, P. Hans, Z. Renren\ Process Safety and Environmental Protection. 2023. 178. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.091>
6. Zhengbing L., Huixia F., Yongtu L., Ning X., Siming N., Haoran Z. A leakage risk assessment method for hazardous liquid pipeline based on Markov chain Monte Carlo. \L. Zhengbing, F. Huixia, L. Yongtu, X. Ning, N. Siming, Z. Haoran\ International Journal of Critical Infrastructure Protection. 2019. 27: 100325. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.100325>
7. Liu C., Liao Y., Liang J. et. al. Quantifying methane release and dispersion estimations for buried natural gas pipeline leakages [J]. \C. Liu, Y. Liao, J. Liang et. al. \ Process Saf Environ Protect. 2021. 146:552–563.
8. Wang X., Tan Y., Zhang T. et. al. (2021) Numerical study on the diffusion process of pinhole leakage of natural gas from underground pipelines to the soil [J]. \X. Wang, Y. Tan, T. Zhang et. al.\ J Nat Gas Sci Eng. 2021. 87:103792.
9. Bu F., Liu Y., Liu YB. et. al. (2021) Leakage diffusion characteristics and harmful boundary analysis of buried natural gas pipeline under multiple working conditions [J]. \F. Bu, Y. Liu, YB. Liu et. al. \ J Nat Gas Sci Eng. 2021. 94:15.
10. Лаврик В.Е., Булавацький В.М. Про розв'язок однієї задачі імпульсно-гідродинамічної теорії заглиблених зарядів. /В.Е. Лаврик, Ю.О. Булавацький//Доповіді АН УРСР, серія А, Фізико-математичні та технічні науки. 1976. 3:226-229.

References

1. Houssin-Agbomson D., Blanchetière G., Mccollum D. et. al. (2018) Consequences of a 12-mm diameter high pressure gas release on a buried pipeline. Experimental setup and results [J]. J Loss Prev Process Ind. 54:183–9.
2. Xie Yushu, Wu Zhongzhi, LV Lianghai, et. al.(2012) Experimental Study on the diffusion of Pipeline natural gas leakage in soil [J]. China Safety Sci J, 8(04): 13–7.
3. Junbao X, Xiaomei H, Zhiwei L et al (2016) Experimental study on the leakage flow and diffusion law of buried gas pipeline [J]. Gas & Heat 36(06):36–42.
4. Cui J, Ma SY, Liang YP et. al. (2014) Numerical simulation of perforation caused leakage diffusion of buried gas pipelines [J]. Appl Mechan Mat. 509:135–40.
5. Xinhong Li, Jie Ma, Hans Pasman, Renren Zhang. (2023) Dynamic risk investigation of urban natural gas pipeline accidents using Stochastic Petri net approach. Process Safety and Environmental Protection. 178. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.091>
6. Zhengbing Li, Huixia Feng, Yongtu Liang, Ning Xu, Siming Nie, Haoran Zhang. (2019) A leakage risk assessment method for hazardous liquid pipeline based on Markov chain Monte Carlo. International Journal of Critical Infrastructure Protection. 27:100325. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.100325>
7. Liu CW, Liao YH, Liang J. et. al. (2021) Quantifying methane release and dispersion estimations for buried natural gas pipeline leakages [J]. Process Saf Environ Protect 146:552–563.
8. Wang XM, Tan YF, Zhang TT et. al. (2021) Numerical study on the diffusion process of pinhole leakage of natural gas from underground pipelines to the soil [J]. J Nat Gas Sci Eng. 87:103792.
9. Bu FX, Liu Y., Liu YB et. al. (2021) Leakage diffusion characteristics and harmful boundary analysis of buried natural gas pipeline under multiple working conditions [J]. J Nat Gas Sci Eng. 94:15.
10. Lavrik V.I., Bulavackij V.M. (1976) On solution of one problem of pulse-hydrodynamic theory of explosion for deep-seated charge outburst. Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Series A. Physical, mathematical and technical sciences. 3:226-229.

Стаття надійшла до редакції 05.01.2026
Стаття прийнята до друку 27.02.2026
Дата публікації статті 26.03.2026



Ісаєв Володимир Федорович

Одеська державна академія архітектури та будівництва,
к.т.н., доцент,
вул. Дідріхсона, 4 Одеса, Україна 65029
isaevv5@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-9947-7284

Пальчик Сергій

Одеська державна академія архітектури та будівництва,
аспірант,
вул. Дідріхсона, 4 Одеса, Україна 65029
spalchyk@ukr.net,
ORCID:0009-0000-0425-4719

Для посилань:

Ісаєв В. Ф., Пальчик С. С. Про модель розповсюдження сейсмовибухових хвиль. Механіка та математичні методи, 2026. Т. VIII. №. 1. С. 84-94.

For references:

V. Isaev, S. Palchuk (2026). On a model of seismic-explosive wave propagation. Mechanics and Mathematical Methods. VIII (1). 84 –94.

Про модель розповсюдження сейсмовибухових хвиль © 2026 by Ісаєв В. Ф., Пальчик С. С. is licensed under CC BY 4.0