

Деформация набухания при увлажнении горячей водой $T=40\div 80^{\circ}\text{C}$ и более протекает значительно быстрее, чем при увлажнении водой при $T=18\div 20^{\circ}\text{C}$, а также имеет большие величины относительных и абсолютных деформаций.

Для описания закономерностей деформации набухания при увлажнении водой во времени t подходит теория ползучести предложенная Ю.Н. Работновым.

Список использованных источников

1. Мустафиев А.А. Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах. М.: Изд. «Высшая школа», 1989. – 590с.
2. Сорочан Е.А. Строительство сооружений на набухающих грунтах. – М.: Стройиздат, 1974. – 225с.
3. Злочевская Р.И. и др. Исследование взаимодействия глин с кислыми и щелочными растворами в процессе их набухания./Р.И. Злочевская, В.И. Дивисилова, Г.А. Куприна, Е.М. Сергеев.// - В кн.: Связанная вода в дисперсных системах. М.: 1974, вып. 3. – с.4÷20.
4. Цытович Н.А. Основания и фундаменты. М.: «Высшая школа», 1970. – 382с.
5. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций, М.: Наука, 1968. – 752с.
6. Ржаницын А.Р. Теория ползучести, М.: Стройиздат, 1968. – 46с.

Статья поступила в редакцию 06.03.2015 г.

УДК 622.02

Н. В. Зуєвська, д.т.н., проф., **М. І. Ванчак** асп., **М. В. Туровський** студ. (НТУУ «КПІ»)

ОЦІНКА ДЕФОРМАЦІЙ ПІДЗЕМНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПІД ВПЛИВОМ ВИБУХОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

N. Zuievskya, M. Vanchak, M. Turovskiy (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

EVALUATION OF UNDERGROUND STRUCTURE DEFORMATIONS CAUSED BY BLASTING LOAD

У статті описано вплив підземного вибуху на металеву конструкцію, що знаходиться в ґрунтовому масиві з використанням програми LS – DYNA. Враховуючи властивості ґрунту і взаємодію ґрунт – конструкція, розглянуто поширення вибухової хвилі у ґрунтовому масиві та представлені зони напружень і горизонтальні деформації металевої конструкції. В роботі показана залежність деформацій підземної конструкції від відстані до джерела вибуху. Результати цього дослідження дають інформацію про вплив підземного

вибуху на конструкцію і можуть бути використані для оцінки напружено-деформованого стану підземних інженерних споруд.

Ключові слова: підземний вибух, чисельне моделювання, металева конструкція, ґрунт.

В статье описано влияние подземного взрыва на металлическую конструкцию, которая находится в грунтовом массиве с использованием программы LS - DYNA. Учитывая свойства почвы и взаимодействие грунт - конструкция, рассмотрено распространение взрывной волны в грунтовом массиве и представлены зоны напряжений и горизонтальные деформации металлической конструкции. В работе показана зависимость деформаций подземной конструкции от расстояния до источника взрыва. Результаты этого исследования дают информацию о влиянии подземного взрыва на конструкцию и могут быть использованы для оценки напряженно-деформированного состояния подземных инженерных сооружений.

Ключевые слова: подземный взрыв, численное моделирование, металлическая конструкция, ґрунт.

This paper treats the underground blast response of a metallic structure in a soil using LS - DYNA. Given the properties of the soil and the soil - structure interaction, the blast wave propagation in the soil is considered and stress zones and horizontal deformation of the metal structure are presented. The paper shows the dependency between the underground structure deformation and the distance from the source of the explosion. The results of this study provide information about the impact of an underground explosion on the structure and can be used to assess stress analysis in underground engineering.

Keywords: underground explosion; numerical simulation; metallic construction, soil.

Вступ. Технічний стан підземних споруд, що перебувають під впливом вибухових навантажень є важливою областю досліджень. Підземний вибух викликає ударну хвилю, що поширюється в навколишньому середовищі. Якщо вибух стався поруч з підземною конструкцією, тиск ґрунту призведе до серйозного пошкодження або навіть руйнування споруди. Таким чином, коливання ґрунтів в результаті підземного вибуху становлять інтерес для інженерів, які займаються проектуванням і будівництвом підземних споруд та їх збереженням. З метою перевірки аналітичних розрахунків доцільно використовувати високопродуктивні обчислювальні засоби, які мають необхідне математичне та програмне забезпечення.

Математичне моделювання є одним з найбільш ефективних способів оцінки міцності, прогнозування довговічності та оптимізації конструкцій і технологічних процесів будівництва, в основі яких лежить процес вибуху. Однією з найбільш ефективних систем автоматизованого інженерного аналізу є програма «ANSYS/LS – DYNA». LS - DYNA - багатоцільова програма, призначена для розв'язання тривимірних динамічних нелінійних задач механіки деформованого твердого тіла і механіки рідини і газу. Програма була першою в своїй галузі і послужила основою для більшості сучасних пакетів високонелінійного динамічного аналізу.

Мета роботи. Визначити остаточні горизонтальні зміщення підземної конструкції, що спричинені дією вибухового навантаження в ґрунтовому масиві.

Постановка задачі. На теперішній час відомо кілька підходів до опису руху деформованого суцільного середовища [1,2]. До них відносяться лагранжевий, ейлеровий і лагранжево-ейлеровий підходи. Останній підхід називається Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation. Області застосування кожного з цих підходів досить добре відомі [3]. Лагранжевий підхід (Lagrangian Formulation) має обмежене застосування для вирішення завдань з великими змінами форм. Сильне викривлення сітки, особливо в зоні контакту, може призвести до появи в отриманому вирішенні нефізичних ефектів. До того ж, при вирішенні завдань часто виникають ситуації, коли різні частини даної системи проявляють різні типи механічної поведінки, наприклад, одна частина системи поводить себе як рідина, інша - як тверде тіло. У такій ситуації для опису руху твердої частини може бути застосований лагранжевий підхід, а для опису руху рідини - ейлеровий. У цьому випадку при моделюванні взаємодії розглянутих частин може бути використаний реалізований у програмі LS-DYNA ефективний алгоритм лагранжево-ейлерового зв'язування. Він має назву, Fluid-Structure Interaction.

Розробка моделі для чисельного моделювання дії підземного вибуху на металеву конструкцію в ґрунтовому масиві включає в себе наступні завдання:

- детонація вибухової речовини;
- розповсюдження ударної хвилі в середовищі;
- взаємодія ударної хвилі з елементами конструкції;
- реакція конструкції на вибухову дію.

Ці задачі можуть бути вирішені в LS-DYNA з використанням багатокомпонентної гідродинаміки (Multimaterial Eulerian Hydrodynamics) та вільних лагранжево-ейлерових сіток (Arbitrary Lagrangian-Eulerian)[4,5].

Процес розробки моделі для чисельного моделювання складається з двох частин. Перша – геометрія, розроблена за допомогою LS – PrePost. Друга частина - моделювання, була реалізована за допомогою вирішувача LS-DYNA.

В роботі розглядається підземна конструкція, яка має вигляд алюмінієвої труби довжиною 12 м з круглим перерізом. В табл. 1 наведені розміри і властивості цієї металевої конструкції.

Таблиця 1. Розмір і властивості металевої конструкції

Характеристики	Значення
Зовнішній діаметр	300 мм
Внутрішній діаметр	250 мм
Щільність	2730 кг/м ³
Модуль пружності	71 ГПа
Межа міцності на розтяг	150 МПа
Межа текучості	145 МПа
Коефіцієнт Пуассона	0,33

Принципова схема зображена на рис. 1.

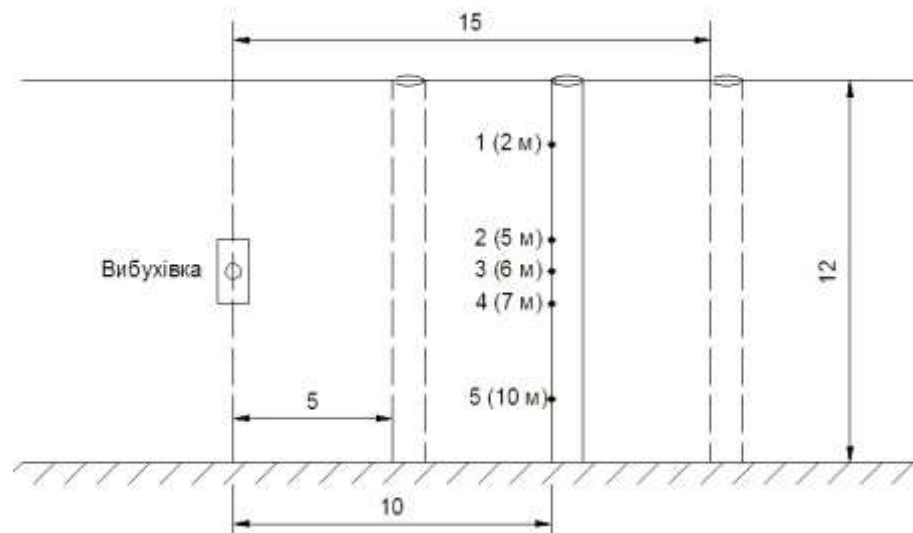


Рис.1. Принципова схема

Джерело вибуху приймається циліндричної форми і розташоване посередині глибини ґрунту (тобто 6 м від поверхні) і на відстані 10 м від металевої конструкції.

Загальна геометрична модель ділиться на різні частини, що представляють ґрунт, металеву конструкцію і вибухівку. З метою збереження часу для обчислення, була змодельована тільки чверть системи а інші частини приймаються симетричними. Ейлерові сітки використовувались для вибухової речовини і частини ґрунту, близької до вибухової речовини. Це необхідно для усунення викривлення сітки при високих деформаціях. З іншого боку - лагранжеві сітки були використані для моделювання решти системи, включаючи металеву конструкцію і область ґрунту без вибухової речовини. Матеріали вибухової речовини та ближнього поля ґрунту в LS-DYNA визначаються як мульти-матеріал (ALE MULTI MATERIAL GROUP) [6]. Таким чином, використовуючи цю техніку, сітки будуть фіксовані в просторі і продукти вибуху здатні розширити початкові сітки ґрунту.

У представленому чисельному моделюванні, тиск вибуху діє на металеву конструкцію побічно. Тиск вибухової хвилі формується за алгоритмом LS-DYNA, який використовує рівняння стану для бризантних вибухових речовин. Було використано рівняння стану Джонса-Уілкінса-Лі JWL (Jones-Wilkin-Lee). Рівняння стану JWL визначає тиск залежно від відносного обсягу V , і початкової енергії на одиницю об'єму, E таке, що [6]

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \text{ де:} \quad (1)$$

p, V – тиск і відносний питомий об'єм продуктів детонації (ПД); E – внутрішня енергія ПД на одиницю об'єму, Дж/м³; A, B, R_1, R_2, ω – емпіричні константи.

Для моделювання детонації вибухової речовини (ВР) використовуються рівняння [6], де горіння частинок (ВР) F , контролює хімічне вивільнення енергії

$$F = \max(F_1, F_2), \quad (2)$$

$$F_1 = \frac{2(t-t_1)D}{3\Delta x}, \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{1-V_1}{1-V_{cj}}, \text{ де:} \quad (4)$$

D - швидкість детонації, ρ – щільність ВР, V_{cj} - величина Чепмена Жуге, V - відносний об'єм, t_1 – час ініціювання, t - поточний час і Δx - довжина елемента.

І тоді тиск можна представити, як:

$$P = F \cdot P_{EOS}, \text{ де:} \quad (5)$$

P_{EOS} - тиск ПД.

В якості вибухової речовини було обрано тротил масою 100 кг. Щільність вибухової речовини складає 1630 кг/м^3 , а швидкість детонації – 6930 м/с .

Найбільш підходящою для моделювання ґрунту в LS-DYNA є модель MAT FHWА SOIL [7]. Основні характеристики наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Властивості ґрунту

Характеристики	Значення
Щільність ґрунту	2.65 кг/м^3
Питома вага	1.91 кг/м^3
Модуль всебічного стиску	$38 \times 10^9 \text{ Па}$
Модуль зсуву	$44 \times 10^9 \text{ Па}$
Кут внутрішнього тертя	0,61 рад
Зчеплення ґрунту	$5 \times 10^4 \text{ Па}$
Коефіцієнт пористості	0.67

Моделювання було проведено в два етапи. Перший крок - ініціалізація напруги, щоб викликати стійкий стан попереднього напруження в моделі з використанням опції DYNAMIC RELAXATION в LS-DYNA[6].

Наступним етапом після фази динамічної релаксації задається вибух. На цьому етапі розглядалося поширення вибухової хвилі через ґрунтовий масив. Значення тиску вибухової хвилі є високими в безпосередній близькості від заряду і вони зменшуються зі збільшенням відстані. Далі було розглянуто питання реакції металевої конструкції на вибухову дію. Для аналізу було обрано 5 точок моніторингу для фіксації остаточного горизонтального зміщення, як зображено на рис. 1. Залежність горизонтального зміщення точок металевої конструкції від часу показана на рисунку 4. В даному випадку відстань від джерела вибуху до металевої конструкції складає 10 м.

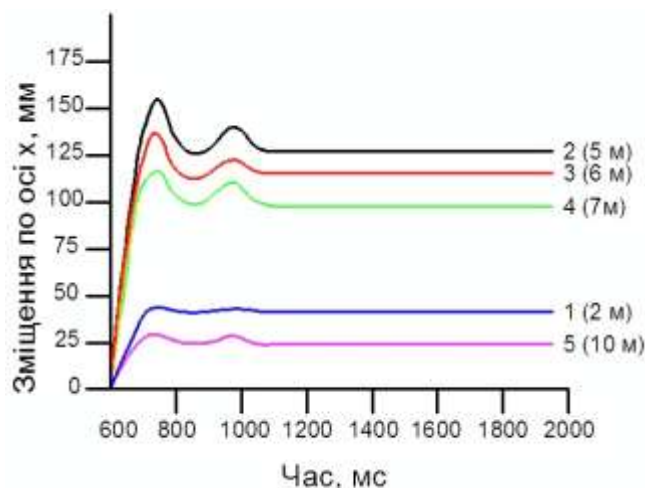


Рис. 4. Залежність горизонтального зміщення точок металевієї конструкції від часу

На рис. 5 зображено остаточне горизонтальне зміщення точок, що досліджуються. Додатково було розглянуто ще два варіанти: відстань від джерела вибуху до металевієї конструкції складає 5 та 15 м.

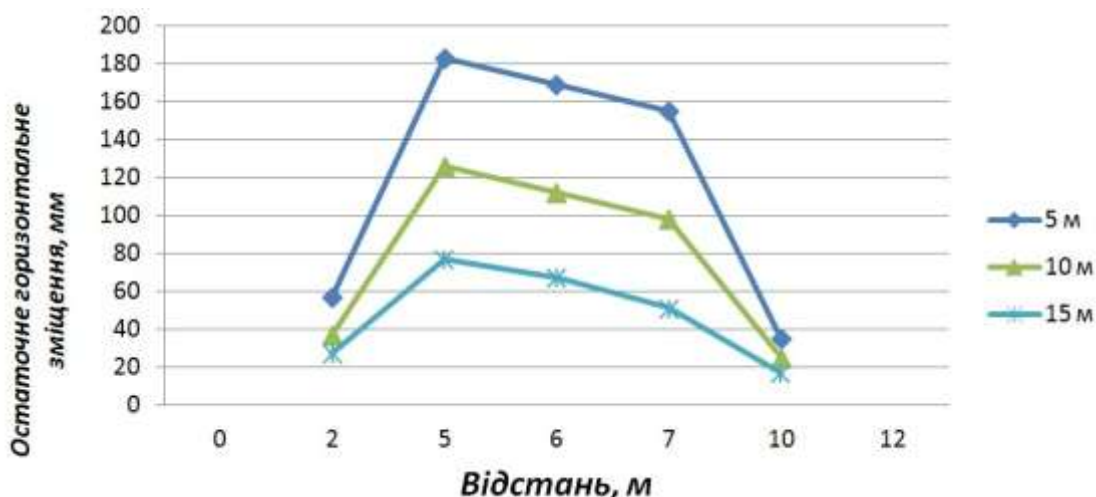


Рис. 5. Остаточне горизонтальне зміщення металевієї конструкції

Максимальні остаточні зміщення спостерігаються у точці 2 на глибині 5 метрів від поверхні: 183 мм, 126 мм та 77 мм відповідно. Чисельні результати моделювання показують, що верхня частина металевієї конструкції зазнає більших остаточних горизонтальних зміщень в порівнянні з нижньою. Також спостерігається різке зменшення реакції конструкції зі збільшенням відстані до джерела вибуху. Результати цього дослідження в майбутньому будуть направлені на визначення критеріїв руйнування конструкції під дією вибуху, а також на зміну параметрів вибухової речовини.

Висновки

В даній статті розглядається питання моделювання підземного вибуху а також його вплив на оточуючі підземні споруди. Для оцінки напружено-

деформованого стану металеві конструкції в ґрунтовому масиві під дією підземного вибуху був використаний розрахунковий комплекс Ansys / LS – DYNA. Результати чисельного моделювання показують значення динамічного напруження ґрунту та дозволяють визначити остаточні горизонтальні деформації металеві конструкції, що перебуває під дією вибуху. Максимальні остаточні зміщення спостерігаються у точці 2 на глибині 5 метрів від поверхні: 183мм, 126мм та 77 мм відповідно на відстані 5, 10 та 15 метрів від джерела вибуху. На основі отриманих результатів та шляхом варіації відстані до джерела вибуху, маси та форми заряду ВР, зміни параметрів самої вибухової речовини, можливо вирішити питання збереження конструкції, що перебуває під впливом вибухової дії.

Список використаних джерел

1. І. А. Лучко, Н. С. Ремез, А. І. Лучко Математичне моделювання дії вибуху в ґрунтах і гірських породах / К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 264с
2. Фізика взрива / С.Г. Андреев, Ю.А. Бабкин, Ф.А. Баум и др. / Под ред. Орленко Л.П. – Изд. 3-е, перераб. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2002. – в 2 т. Т.1. – 832 с.
3. John O. Hallquist. LS-DYNA. Theory manual. Livermore Software Technology Corporation. March, 2006. – 680p.
4. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA: учебное пособие / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с.
5. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 379 с.
6. LS-DYNA, Livermore software technology cooperation, LS-DYNA user's manual, version 971, 2007.
7. В.А. Lewis, Manual for LS-DYNA soil material model 147, Federal Highway Administration, FHWA-HRT-04-095, McLean, VA, 2004.

Стаття надійшла до редакції 18.03.2015 р.