

© Н.В. Зуєвська<sup>1</sup>, Л.В. Шайдецька<sup>1</sup>, Р.І. Семчук<sup>1</sup>, О.В. Халимендик<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХИЩЕНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ВІД ДІЇ ВИБУХУ

© N. Zuievskaya<sup>1</sup>, L. Shaidetska<sup>1</sup>, R. Semchuk<sup>1</sup>, O. Khalymendyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## ENSURING THE PROTECTION OF CRITICAL INFRASTRUCTURE ENERGY FACILITIES FROM EXPLOSIONS

**Мета.** Аналіз забезпеченості захисту об'єктів енергетичної критичної інфраструктури які часто зазнають руйнації під дією ударної хвилі, що впливає на стійкість енергосистем України. Визначення стану захищеності критичної інфраструктури, за якого забезпечується функціональність, безперервність роботи, цілісність і її стійкість, що відображається на життєзабезпеченні населення.

**Методика.** Для досягнення поставленої мети проведено моделювання детонаційного вибуху та розподіл ударних хвиль в межах призматичних тіл, що імітують міську забудову з використанням програмного продукту ANSYS AUTODYN. В умовах щільної міської забудови заходи по забезпеченості захисту об'єктів критичної інфраструктури обираються виходячи із взаємодії рідин, газів і твердих тіл, фазових переходів, поширення ударних хвиль тощо.

**Отримані результати дослідження.** Визначені розраховані параметри межі розподілу ударної хвилі через 15 мс після детонації, зафіксовані дані тисків  $P_{CT}$  які відповідають датчикам замірів T1 та T2, визначено, що значення тиску вибухової хвилі в манометричних точках T1 і T2 найбільші близько 5 мс при цьому тиски на підземну споруду майже на 50% менші від наземної.

Запропоновано захист об'єктів енергетичної критичної інфраструктури у вигляді будівництва підземних трансформаторних підстанцій та їх модернізація в умовах щільної міської забудови. Це є оптимальне рішення для усунення проблем, які виникають з збільшенням навантажень в міських електромережах та захист їх від дії вибухової хвилі.

**Наукова новизна.** Отримані залежності розподілу тисків від ударної хвилі в часі для двох варіантів розташування об'єктів енергетичної критичної інфраструктури, а саме підземне розташування і наземне розташування в міському середовищі. При цьому були враховані параметри матеріалів споруди та характеристики та кількість вибухової речовини.

**Практичне значення.** Будівництво підземних трансформаторних підстанцій та їх модернізація в умовах щільної міської забудови є оптимальне рішення для усунення проблем, які виникають з збільшенням навантажень в міських електромережах та захист їх від дії вибухової хвилі.

**Ключові слова:** критична інфраструктура, трансформаторні підстанції, вибух, математичне моделювання, програмний комплекс ANSYS.

**Вступ.** Вітчизняна об'єднана енергетична система (ОЕС) становить сукупність електростанцій, електро- та тепломереж, що функціонують в режимах генерації, передачі та розподілу теплової та електричної енергії. На сьогодні енергетична система є гарантом стабільності та безпеки в Україні. Енергетична система України має розгалужену структуру, в якій функціонування відбувається на основі взаємодії всіх елементів. Враховуючи

екстенсивний шлях розвитку урбанізації зростання міст і формування міських структур та наслідки складних умов сьогодення, численні ворожі обстріли, електроенергетика України піддається багатьма викликам.

Тому безпека та безперебійність енергосистеми є важливою умовою функціонування та розвитку економіки регіонів та країни в цілому. В Україні в результаті військових дій можливі пошкоджено ряду критично важливих об'єктів енергетичної системи, що негативно може впливати на функціонування всіх об'єктів (економічних, соціальних, державних) на невизначений термін.

Одним із шляхів вирішення проблем територіального розташування енергетичних об'єктів, збереження історичного простору міст, підвищення стійкості та резистентності систем енергозабезпечення є будівництво заглиблених або напівзаглиблених трансформаторних підстанцій (ТП) як основного блоку системи енергозабезпечення з дотриманням санітарно-захисних зон (СЗЗ).

Досвід будівництва заглиблених та підземних трансформаторних підстанцій із зарубіжної практики показує, що заглиблені і підземні трансформаторні підстанції – реальність для нашої енергетики. Обслуговування сучасної підземних підстанцій відбувається абсолютно в автоматичному, комп'ютерному режимі. На даний час стають звичними потужні підстанції, заховані під землю на території щільної міської забудови або в історичних районах міст. Подібні об'єкти вже давно будують в інших країнах світу – Швейцарії, Німеччині, Японії, Франції. Підземна підстанція працює під Кельнським собором і під однією зі шкіл Цюріха. В центрі Парижа підстанції вбудовують в історичні будівлі тощо [1].

Одним з провідних європейських виробників технічних будівель для енергетики та водогосподарства є чесько-німецька компанія «BETONBAU» [2]. Яка пропонує широкий вибір типових проектів підземних, заглиблених, прибудованих та вбудованих конструкцій трансформаторних підстанцій, з врахуванням містобудівної ситуації та рельєфу місцевості.

Кожна підземна підстанція складається із 3-х блоків. Кожен блок підстанції відлитий із залізобетону. Об'ємні приямки кожного залізобетонного блоку формуються фальшпідлогою. На фальшпідлогу встановлено обладнання 0,4–6 кВ, отвори закриті кришками. Трансформаторний відсік відокремлений від щитового приміщення суцільний металевою перегородкою. В об'ємному приямку трансформаторного відсіку встановлено вентилятор продування повітря. У всіх блоках, у приямках щитового відсіку, встановлені насоси для аварійної відкачування води. Підведення повітря здійснюється через припливні шахти блоків, а відведення повітря виробляється через витяжні шахти трансформаторних відсіків та відсіку розподільного пристрою 0,4 кВ.

**Актуальність дослідження.** Безпека критичної інфраструктури є актуальною проблемою так як стан захищеності критичної інфраструктури, за якого забезпечується функціональність, безперервність роботи, цілісність і її стійкість відображається на життєзабезпеченні населення зокрема у сфері постачання електричної енергії

**Мета досліджень** обумовлена збройною агресією зі сторони Російської Федерації, що несе небезпеку державній незалежності України, її територіальній цілісності та потребує захисту об'єктів критичної інфраструктури які часто зазнають руйнації з боку агресора, що впливає на стійкість енергосистем України.

**Викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.**

На етапі проектування підземних трансформаторних підстанцій повинні враховуватися не тільки їх технічні характеристики, тобто типорозміри і потужності для зручності експлуатації, зменшення вартості і полегшення резервування. А також і чинники які формуються в підземному просторі урбосистем під впливом природних та антропогенних факторів.

Одним із факторів виникнення надзвичайних ситуацій в підземних трансформаторних підстанціях є зниження експлуатаційної стійкості підземних споруд критичної інфраструктури, для будівництва яких в основному використовуються залізобетонні конструкції, збірні або монолітні.

Такі конструкції мають ряд недоліків, а саме врахування складних гідрогеологічних умов на майданчику будівництва через велике заглиблення, наявність кількох горизонтів ґрунтових вод; підвищені вимоги до зовнішньої гідроізоляції підземної підстанції; тепловиділення від працюючого обладнання, підвищена вологість; значні витрати на будівельні технології в порівнянні з наземними підстанціями; внутрішнє оздоблення приміщень підстанції має бути виконана з високоякісних матеріалів, які підлягають обов'язковій сертифікації в області гігієнічної та пожежної безпеки.

Підземні трансформаторні підстанції (рис. 1) мають високий ступінь безпеки, не мають шкідливого впливу на оточуюче середовище. Для заглиблених або напівзаглиблених підземних підстанцій суттєво зменшуються санітарно-безпечні норми, що може сприяти вирішенню проблеми нестачі вільного простору для розміщення нових джерел електроенергії в історичних центрах міст. Якщо розглядати підземні трансформаторні підстанції як об'єкти критичної інфраструктури міст, то можна виділити їх підвищену захищеність від динамічних впливів різного походження, як то шторми, вітри, розліт уламків, вибухові впливи, так і захищеність від проникнення сторонніх людей та тварин.

Блоки виготовляються з бетону з класом міцності на стиск – В30, морозостійкістю – F200, водонепроникністю – W8. Підстанції мають блокову залізобетонну оболонку 80 мм з армуванням, що підвищує її міцність, і спеціальну вологостійку зовнішню обробку модулів, що витримує активність ґрунтових вод. Доступ на підстанцію здійснюється через герметичні люки. Підстанції мають ширину від 3 до 6 метрів. Довжина може бути від 6–16 метрів до довжини, пов'язаної

з побажаннями замовника. У нашому випадку: довжина – 15,8 м, ширина – 5,8 м, висота – 5,5 м.

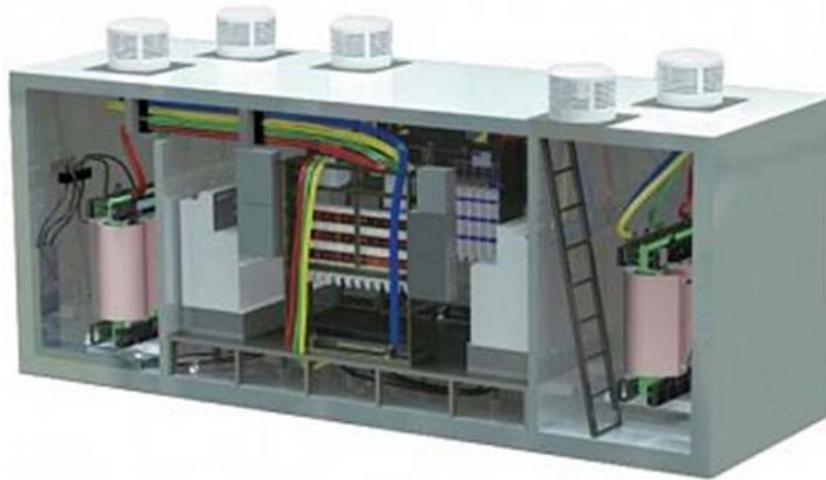


Рис. 1. Модель підземної трансформаторної підстанції

Розглянуто вплив вибуху в урбанізованій місцевості на об'єкти критичної інфраструктури, а саме на трансформаторну підстанцію, у випадках наземного та підземного розташування. Сучасна концепція вимагає, щоб математичні моделі супроводжували об'єкти на всіх етапах: проектуванні, будівництві, експлуатації.

Ефективне, економічно обґрунтоване розв'язання цих задач здійснюється на основі прогнозного математичного моделювання. Необхідно використовувати розроблені програмні та алгоритмічні комплекси, визнані у світі, такі як ANSYS AUTODYN.

Для створення комп'ютерної моделі вибухового ефекту вибуху були використані наступні рівняння і моделі:

– для тротилу (в програмі TNT) – рівняння Джонса-Уілкінса-Лі (JWL), що описує стан і поведінку продуктів детонації має вигляд:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V} \right) \cdot e^{-R_1 \cdot V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V} \right) \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{\omega \cdot E_0}{V},$$

де  $A, B, R_1, R_2, \omega$  – еталонні константи ізентропа TNT,  $V$  – питома вага,  $E_0$  – рівень хімічної енергії.

– для повітря (в програмі AIR) – рівняння Ideal Gas, яке описує залежність між тиском, об'ємом і абсолютною температурою газу. Внутрішню енергію початкового стану повітря встановили рівним  $2,068 \times 10^5$  Дж/кг, щоб ініціалізувати його тиском 1 атмосфера.

$$p = (\gamma - 1)\rho\varepsilon,$$

де  $\gamma = \text{const} > 1$ ,  $\rho$  – густина,  $\varepsilon$  – енергія / маса.

AUTODYN включає два типи Ейлерових рішень:

1. Multi-material Euler Solver – явна схема Годунова другого порядку точності.
2. Euler Blast Solver (single material, ideal gas) – заснований на алгоритмі корекції потоків FCT.

Модель матеріалу складається з наступних компонентів:

– рівняння стану (EOS) – відображає зв'язок між тиском  $p$ , щільністю  $\rho$  і питомою енергією  $e$ . При гідростатичному навантаженні усі три компоненти напруження є рівними;

– міцнісна модель – відображає стійкість до зсуву. Це відображається у переході між пружною і пластичною стадіями деформації і залежить від параметра плинності матеріалу, що є функцією властивостей матеріалу, таких як деформація, швидкість деформації та/або накопичена енергія;

– модель руйнування – вводиться у модель матеріалу для обліку напруження розтягнення або стиснення і їх меж. Модель руйнування визначає початок руйнування, яке може бути визначено шляхом критичної величини змінної (наприклад, тиску або ефективної пластичної деформації);

– ерозія – дозволяє подолати проблему великого спотворення Лагранжевої сітки. Елемент видаляється з розрахунку, коли деформація перевищує задане обмеження.

У розрахунковій моделі в якості ґрунту застосуємо лесовидний суглинок, який відрізняється великим вмістом глинистих частинок, присутністю грубого піщаного і (рідше) галькового матеріалу. Головними хімічними компонентами глинистих порід є  $\text{SiO}_2$  (кварцовий пісок),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , в підлеглих кількостях присутні  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  і органічні речовини [3]. Параметри моделі матеріалу для вологого піску з 30% гравію представлено у табл. 1.

В розрахунку враховуємо, що у нас вибух надземний на висоті 40 см від поверхні ґрунту.

Параметри вибухової речовини, TNT,  $m = 0,016$  кг,  $\rho_{\text{TNT}} = 1630$  кг/м<sup>3</sup>, радіус заряду  $R_c = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}} = 0,01328$  м.

Властивості моделі застосованої ВР (тринітротолуол) уточнено згідно [4, 5].

Для аналізу впливу вибуху на трансформаторні підстанції обираємо довільно дві манометричні точки T1 і T2 (координати точок наведені в табл. 2). Точка 1 – центр передньої грані підземної трансформаторної підстанції, а точка 2 відповідно – центр передньої грані наземної. В програмі ANSYS – вид і розташування точок підриву та калібру (непрозорість матеріалів встановлена на 0,5). Результати розрахунку наведені на рис. 2–4. Відстань від центру вибуху до підстанцій приймається однаковий 50 метрів, маса вибухівки 500 кг TNT. Заглиблення підземної споруди на 1 метр.

Таблиця 1

Параметри моделі матеріалу для вологого піску з 30% гравію

Величина		Прикладна модель відношень										
Од. вимір.		Рівняння стану (EOS) стиснення										
Довідкова густина		2641,0										
Густина	кг/м <sup>3</sup>	2090	2119	2149	2179	2209	2239	2269	2300	2362		
Тиск	МПа	565,1	1,30·10 <sup>3</sup>	2,04·10 <sup>3</sup>	2,77·10 <sup>3</sup>	3,51·10 <sup>3</sup>	4,25·10 <sup>3</sup>	4,99·10 <sup>3</sup>	5,73·10 <sup>3</sup>	7,20·10 <sup>3</sup>		
Швидкість хвилі	м/с	5016	5016	5016	5016	5016	5016	5016	5016	5016		
Міцнісна модель у гранульованому стані												
Тиск	МПа	46,15	92,30	138,5	184,6	230,7	–	–	–	–		
Межа плинності	МПа	27,00	87,26	180,8	307,6	307,6	–	–	–	–		
Густина	кг/м <sup>3</sup>	2092	2122	2152	2182	2212	2242	2272	2302	2362		
Модуль зсуву	МПа	1,70·10 <sup>3</sup>	2,53·10 <sup>4</sup>	2,53·10 <sup>4</sup>	2,53·10 <sup>4</sup>	2,53·10 <sup>4</sup>	2,53·10 <sup>4</sup>	2,53·10 <sup>4</sup>	2,53·10 <sup>4</sup>	2,53·10 <sup>4</sup>		
Модель руйнування												
Межа міцності при розтягненні	кПа	80,56										
Ерозія												
Миттєва геометрична деформація	–	2,0										

Координати датчиків замірів  $P_{ст}$

№	X, мм	Y, мм	Z, мм
T1	302	1100	105
T2	-298	200	105

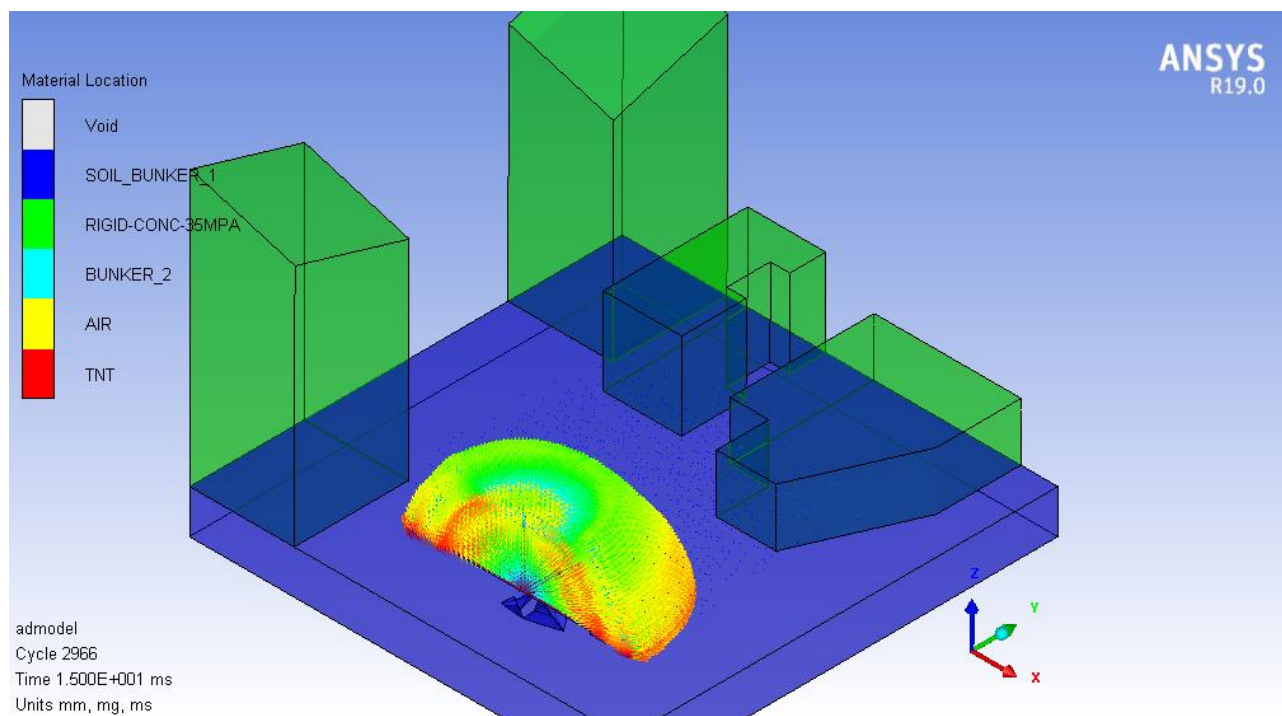


Рис. 2. Розподіл ударної хвилі через 15 мс після детонації

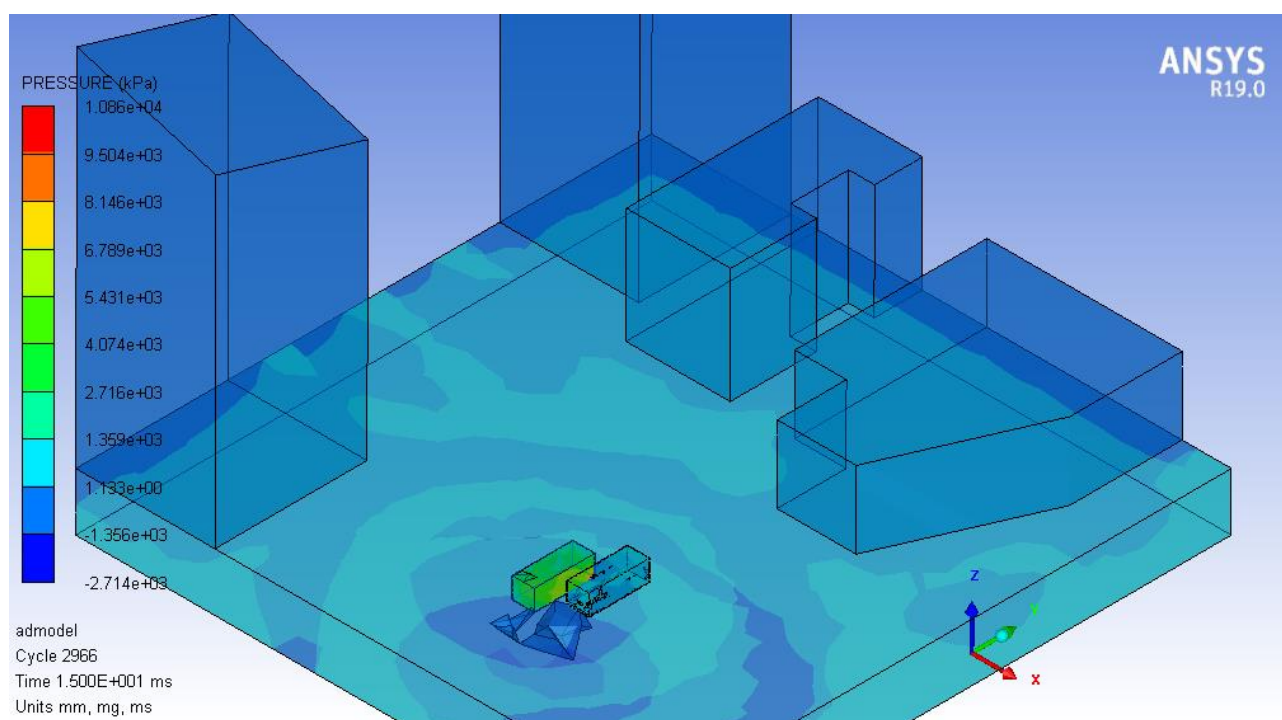


Рис. 3. Розподіл напружень від дії ударної хвилі через 15 мс після детонації



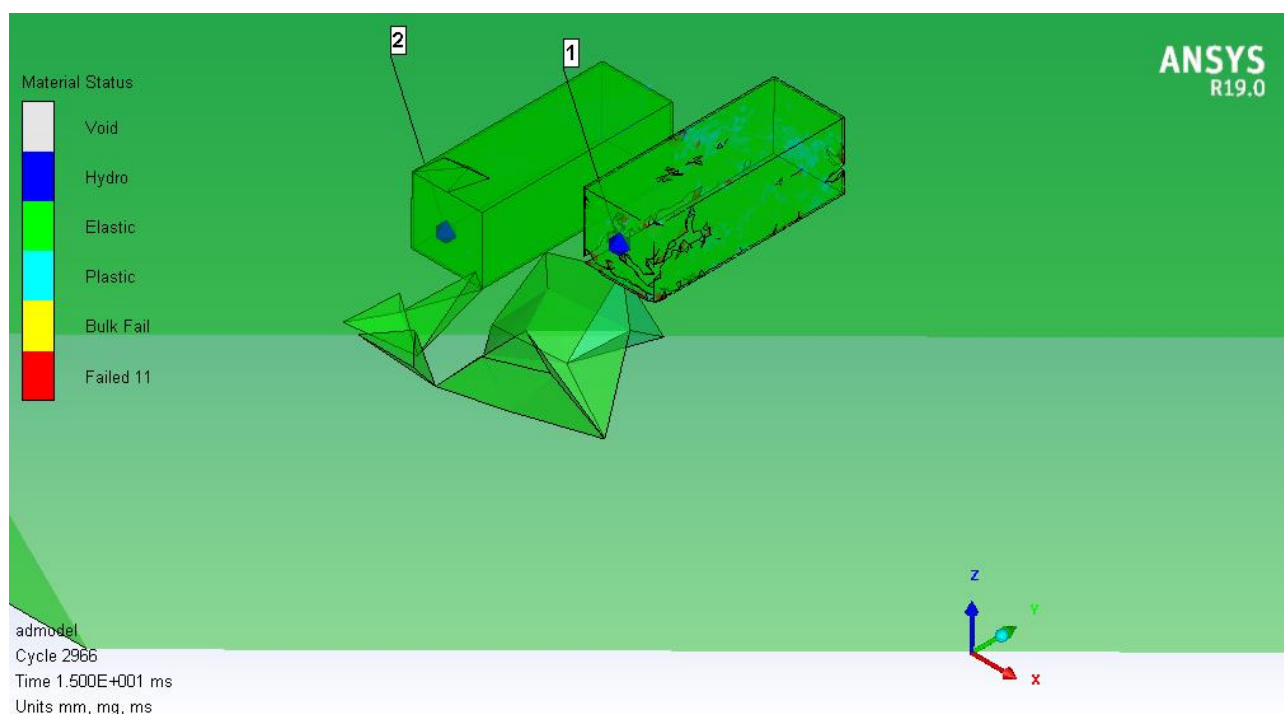


Рис. 4. Руйнування споруд в манометричних точках T1 і T2 від дії ударної хвилі через 15 мс після детонації

#### Gauge History ( Ident 0 - admodel )

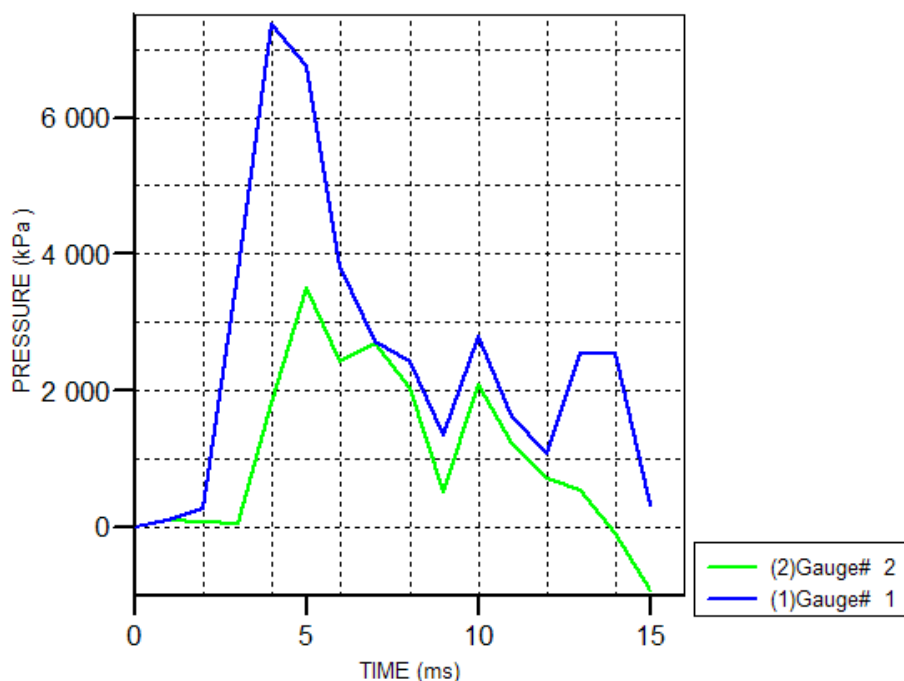


Рис. 5. Графік порівняння значень тиску в манометричних точках T1 і T2

Як показано на рис. 5, значення тиску вибухової хвилі в манометричних точках T1 і T2 набуває максимальних значень в інтервалі часу від 4 до 5 мс. Значення тиску на наземну конструкцію повністю співмірні з результатами



математичного моделювання в роботі [1]. По результатах моделювання видно, що на поверхневій конструкції утворюються тріщини які не сумісні з цілісністю конструкції та обладнання всередині. Тиски на підземну споруду майже на 50% менший від наземної і аналізуючи напружено-деформований стан, ми бачимо зсуви ґрунту навколо підземної підстанції та відсутність ознак руйнування самої споруди.

Останнім часом на об'єктах критичної інфраструктури з метою їх захисту від дії вибуху, почали використовувати габіони військового призначення, які являють собою короб з металевої зварної сітки, який наповнюється сипучим матеріалом (найбільш розповсюджено використання піску). Авторам статті представляється перспективним спрогнозувати ступінь можливих пошкоджень об'єктів критичної інфраструктури і запропонувати найбільш оптимальні умови використання таких габіонів.

### **Висновки:**

1. Прогнозування можливих пошкоджень поверхневих та підземних об'єктів критичної інфраструктури під дією вибуху є актуальним напрямком використання комп'ютерного моделювання на основі сучасних інформаційних технологій.

2. В представленій роботі для оцінювання стійкості споруд енергетичної інфраструктури використано програмний комплекс *ANSYS AUTODYN* дає достовірні дані розподілу ударної хвилі в умовах міської забудови, параметри розподілу тисків на поверхні споруд.

3. В результаті проведеного моделювання можна зробити висновок, що заглиблення залізо-бетонної підстанції навіть на 1 метр виявляється достатнім для збереження цілісності конструкції при умові непрямого попадання. Одним з перспективних шляхів для України є будівництво підземних трансформаторних підстанцій та їх модернізація в умовах щільної міської забудови. Це є оптимальне рішення для усунення проблем, які виникають з збільшенням навантажень в міських електромережах та захист їх від дії вибухової хвилі.

### **Перелік посилань**

1. Remez, N., Dychko, A., Besarabets, Y., Kraychuk, S., Ostapchuk, N. & Yevtieieva, L. (2019). Impact Modelling of Explosion of Mixture Explosive Charges on the Environment. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 3, 37–49. <https://sciendo.com/article/10.2478/lpts-2019-0018>
2. Remez, N., Dychko, A., Kraychuk, S., Ostapchuk, N., Yevtieieva, L., & Bronitskiy, V. (2018). Simulation of seismic explosion waves with underground pipe interaction. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 55(2), 37–44. <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0018>
3. Kravets, V., Remez, N., Kovtun, A., & Shukiurov, A. (2018). Explosive wave propagation in the presence of antiseismic protective curtain. *E3S Web Conf. Ukrainian School of Mining Engineering*, 60, 00011, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000011>
4. Mohammad Mahdi Dehghan Banadaki (2010). *Stress-wave induced Fracture in Rock due to Explosive Action. PhD Thesis*. Department of Civil Engineering, University of Toronto.
5. Vorobyov, V., Pomazan, M., Vorobyova, L., & Shlyk, S. (2017). Simulation of dynamic fracture of the borehole bottom taking into consideration stress concentrator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/1(87), 53–62. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101444>

### ABSTRACT

**Purpose.** Analysis of the protection of critical energy infrastructure facilities, which are often destroyed under the influence of a shock wave, which affects the stability of Ukraine's energy systems. Determination of the state of security of critical infrastructure, which ensures the functionality, continuity of work, integrity and stability, which is reflected in the life support of the population.

**Methodology.** To achieve this goal, a simulation of a detonation explosion and the distribution of shock waves within prismatic bodies simulating urban development using the ANSYS AUTODYN software product were carried out. In conditions of dense urban development, measures to ensure the protection of critical infrastructure facilities are selected based on the interaction of liquids, gases and solids, phase transitions, propagation of shock waves, etc.

**The results of the study were obtained.** The calculated parameters of the shock wave distribution limit in 15 ms after detonation were determined, the pressure data corresponding to the measurement sensors T1 and T2 were recorded, it was determined that the values of the pressure of the blast wave at the manometric points T1 and T2 are the highest about 5 ms, at the same time, the pressure on the underground structure is almost 50% less than on the ground.

Protection of critical energy infrastructure facilities in the form of construction of underground transformer substations and their modernization in conditions of dense urban development is proposed. This is the optimal solution to eliminate problems, which arise with an increase in loads in city power grids and protect them from the action of a blast wave  $P_{CT}$ .

**Originality.** The dependencies of the pressure distribution on the shock wave in time for two variants of shading of critical energy infrastructure objects, namely underground location and ground location in the urban environment, are obtained. At the same time, the parameters of the materials of the structure and the characteristics and amount of explosives were taken into account.

**Practical value.** The construction of underground transformer substations and their modernization in dense urban areas is the optimal solution for eliminating the problems that arise with an increase in loads in city power grids and protecting them from the effects of a blast wave.

**Keywords:** *critical infrastructure, transformer substations, explosion, mathematical modeling, ANSYS software package.*