

УДК 622.083+721.011

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-35>

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ОБ'ЄКТІВ ПІДЗЕМНОЇ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НЕВЕЛИКОГО ЗАГЛИБЛЕННЯ ДО РАКЕТНИХ АТАК

Сахно Іван Георгійович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-8592-0572

Зуєвська Наталя Валеріївна,

доктор технічних наук, професор,
завідувачка кафедри геоінженерії

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0000-0002-1716-1447

Дармостук Денис Георгійович,

докторант кафедри геоінженерії

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0009-0002-3714-9821

Семчук Роман Іванович,

аспірант кафедри геоінженерії

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0009-0007-1336-6246

Зуєвський Юрій Валерійович,

аспірант кафедри геоінженерії

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0009-0006-4736-3150

Сахно Світлана Володимирівна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-3917-9143

Захист населення і критичної інфраструктури від повітряних атак є одним із сучасних викликів країн, що залучені до військових конфліктів. Геополітична обстановка загострює ризик розширення наявних конфліктів на нові країни. Приклад України показує, що ракетні обстріли не тільки створюють загрози для цивільного населення, але й викликають дестабілізацію енергетичної системи, порушення режимів функціонування інженерних споруд газопостачання, водопостачання і водовідведення, що формує значні ризики для стабільного і безпечного функціонування великих міст. Висока загроза енергетичного колапсу неодноразово підтверджувалась за період військових дій в Україні. Одним з найбільш ефективних методів захисту об'єктів критичної інфраструктури від повітряних атак є їх перенесення під землю. Проектні параметри об'єктів підземних урбосистем повинні вибиратись на основі концепції нульового ризику, що виключає можливість їх руйнування ракетними обстрілами. У дослідженні пропонується використання чисельного моделювання для визначення параметрів заглиблення і захисту інженерних комунікацій і споруд енергетики, водопостачання і водовідведення. Розроблено чисельну модель взаємодії балістичної ракети з ґрунтовим середовищем з урахуванням затриманої детонації та проведено оцінювання впливу вибухового навантаження на ґрунтовий масив з використанням програмного середовища ANSYS Explicit Dynamics. Проведено верифікацію чисельної

моделі. Одержано закономірності поведінки ґрунту за вибухового навантаження, включно з динамікою утворення вирви, зонами руйнування, що створює підстави для отримання параметрів заглиблення інженерних систем у різних ґрунтах. Автори вірять, що отримані результати сприятимуть сталому розвитку і глобальній безпеці і будуть корисні країнам, у яких існує ризик військових конфліктів.

Ключові слова: безпека урбосистем, захист підземної інфраструктури, механіка ґрунтів, динамічне навантаження ґрунтів, метод кінцевих елементів, підземні споруди.

Sakhno Ivan, Zuievskia Natalia, Darmostuk Denys, Semchuk Roman, Zuievskyi Yurii, Sakhno Svitlana. Ensuring resistance of underground critical infrastructure objects of short depth to missile attacks

Protection of the population and critical infrastructure from missile attacks is one of the current challenges for countries involved in military conflicts. The geopolitical situation exacerbates the risk of expanding existing conflicts to new countries. The example of Ukraine shows that missile attacks not only pose threats to the civilian population, but also cause destabilization of the energy system, disruption of the operating modes of engineering facilities for gas supply, water supply and sewage, which creates significant risks for the stable and safe functioning of cities. The high threat of energy collapse has been repeatedly confirmed during the period of war in Ukraine. One of the most effective methods of protecting critical infrastructure from air attacks is their transfer underground. This study proposes the use of finite element numerical simulation to determine the parameters of deepening and protection of engineering communications and structures. A numerical model was developed and the impact of the explosive load on the soil mass was assessed using the ANSYS Explicit Dynamics software. The patterns of soil behavior under explosive load were obtained, including the dynamics of crater formation and destruction zones, which creates the basis for obtaining the parameters of deepening of engineering systems in various soils. The authors believe that the results obtained will contribute to sustainable development and global security and will be useful to countries in which there is a risk of military conflicts.

Key words: urban systems safety, protection of underground infrastructure, soil mechanics, dynamic soil loading, finite element method, underground structures.

Вступ. Сучасні глобальні загрози, викликані геополітичним суперництвом, боротьбою за ресурси, етнічними та релігійними конфліктами, торкаються все більше країн. У рамках таких конфліктів, а також терористичних атак ризик ракетних обстрілів інфраструктурних об'єктів зростає у глобальному контексті. Так, з перших днів широкомасштабного вторгнення росії в Україну Київ та інші великі міста України постійно обстрілюються балістичними ракетами. Урбосистеми виявилися не готовими до таких обстрілів, що спричинило неодноразові багатоденні непланові відключення енергії, запровадження стабілізаційних планових відключень, зупинення газо- і водопостачання. Стабільне функціонування великих міст України перебуває під постійною загрозою від початку війни.

Саме через важливість і незахищеність об'єктів критичної інфраструктури вони стають легкою ціллю під час атак. Сучасні ракети як далекобійна та надзвичайно потужна атакуюча зброя становлять серйозну загрозу безпеці об'єктів інфраструктури. Одним з найкращих методів пасивного захисту таких об'єктів є їх перенесення під землю. Об'єкти підземної інфраструктури великих міст, зокрема станції метро, широко використовуються як укриття населення під час обстрілів. Ступінь стійкості подібних споруд до руйнуючої дії сучасних балістичних ракет не оцінювалась, тому прогноз надійності укриттів і параметрів їхньої безпеки є актуальним завданням.

Будівництво підземних укриттів і бомбосховищ має затверджені світові стандарти. Вже сьогодні в Україні активно будуються і вводяться в експлуатацію підземні школи та інші об'єкти цивільного значення. Вітчизняна нормативна база для такого будівництва активно розробляється.

Проте досі інженерні споруди і мережі газопостачання, водопостачання і водовідведення залишаються незахищеними від обстрілів, що формує значні ризики техногенних катастроф і загрози життю великих міст. Розгалуженість і велика протяжність комунальних мереж робить економічно недоцільним використання їх цільового захисту шляхом зовнішнього укріплення, наприклад поверхневим бетонуванням. Хоча в місцях вузлових з'єднань відповідних інженерних споруд (підземних насосних станцій, газорозподільних станцій, каналізаційних насосних станцій) щільність мереж і відповідні ризики настільки високі, що економічна доцільність не є релевантним фактором прийняття рішення про захист.

Для захисту інженерних мереж авторами пропонується збільшити їх заглиблення в місцях підвищеного ризику, а нові відповідальні мережі прокладати на глибинах, що унеможливають їх руйнування через ракетні обстріли і, відповідно, виникнення пов'язаних з обстрілами аварій. Така пропозиція потребує зміни відповідних нормативних документів, будівельних стандартів тощо. Для впровадження такого підходу необхідно розрахувати безпечні параметри

заглиблення інженерних систем у різних типах ґрунтів, що ставить на порядок денний задачу оцінки пошкодження об'єктів внаслідок ракетних обстрілів.

Попередні дослідження щодо захисту цивільних інфраструктурних об'єктів здебільшого були зосереджені на отриманні результатів пошкодження поверхневих будівельних споруд за допомогою аналітичних розрахунків, чисельного моделювання або експериментальних досліджень.

Аналітичні методи є найбільш утилітарними. У цих методах судження про ступінь пошкодження будівельних споруд робиться на підставі розрахунку відомих з будівельної механіки формул та аналізу даних [1–4]. Застосування цих методів загалом дає змогу оцінити кількісні показники збитків від вибухового руйнування, але більшість методів дослідження обмежено конкретними сценаріями застосування, що покладені в основу аналітичних залежностей. Іншими словами, їх можна використовувати лише для вузького кола ситуацій зі схожими характеристиками, що значно звужує сферу використання [5].

Експериментальні методи можуть бути повномасштабними і лабораторними. Повномасштабні експерименти найбільш точні, однак вони вкрай вартісні і не можуть бути використані як основний метод дослідження. Як правило, повномасштабні експерименти використовуються для перевірки гіпотез і визначення ефективності способів захисту. Щодо лабораторних експериментів, то вони мають істотні обмеження, пов'язані з масштабним ефектом під час динамічного навантаження, складністю спостереження граничних умов і підбором властивостей матеріалів, які динамічно навантажуються [6], що значно знижує надійність цього методу.

Чисельні методи є найбільш перспективними для оцінки пошкодження різних об'єктів вибухом і дослідження механізмів динамічного навантаження будівлі [7–9]. Методи чисельного моделювання мають достатню надійність, але процедура цих методів вимагає надійних вхідних даних і перевірки.

Велику кількість досліджень динамічного навантаження чисельними методами проведено для будинків та їх елементів. Для моделювання сейсмічного впливу землетрусів, вибуху газу та обстрілів дослідники використовують сучасні прикладні програми. Elsanadedy та ін. [8] представляють прогресивний аналіз руйнування типової багатоповерхової будівлі зі сталевим каркасом у Ер-Ріяді, щоб визначити її вразливість у разі випадкового вибуху або сценарію терористичної

атаки. Комерційний пакет LS-DYNA використовувався для моделювання реакції будівлі на вибухові хвилі. Almusallam та ін. [10] за допомогою програмного забезпечення LS-DYNA провели прогресивний аналіз руйнування комерційної будівлі, розташованої в місті Ер-Ріяд, яка піддавалася різним сценаріям вибуху. Јата та ін. у роботі [11] представили числове моделювання тонкостінних квадратних порожнистих сталевих балок, що піддаються рівномірному поперечному вибуховому навантаженню, з використанням LS-DYNA порівняно з експериментально спостережуваними глобальними та локальними деформаціями.

Динамічні процеси під час руйнування скельних порід вибухом досліджуються сьогодні вченими гірниками за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Поведінка пісковику під дією вибуху досліджена Mishra et al. [12] методом кінцевих елементів у програмному забезпеченні LS-DYNA та тестом SHPB з використанням моделі Джонсона-Холмквіста, залежної від швидкості деформації. Визначені параметри потім використовувались під час аналізу вибухової стійкості тунелів. Ма та ін. [13] використовували метод кінцевих елементів для дослідження тиску, спричиненого вибухом, на стінку камери та результуючого пошкодження за допомогою програмного забезпечення AUTODYN.

Огляд літератури вказує на те, що дослідження вибухового навантаження об'єктів підземної інфраструктури, що закладені в ґрунтах, а також і самих ґрунтів різних типів внаслідок ракетних обстрілів не проводилося. Оскільки вибухове навантаження має ключові відмінності від статичного і циклічного динамічного, ґрунти та скельні породи під час нього поведуться інакше. Це зумовлює потребу використання в дослідженнях програмного забезпечення, що має відповідний математичний апарат з відображення динамічної дії вибуху. Одним з кращих сучасних програм, які мають у своєму складі необхідний математичний апарат для моделювання динаміки вибуху, є ANSYS Explicit Dynamics, який дає змогу з високою точністю прогнозувати руйнівну дію вибуху.

Ця стаття зосереджена на дослідженні параметрів воронки, що утворюється в ґрунтах з різними властивостями для отримання вихідних даних для визначення параметрів заглиблення інженерних систем у різних ґрунтах, що гарантують їх збереження під час ракетних обстрілів. Описано створену чисельну модель взаємодії балістичної ракети з ґрунтовим середовищем з урахуванням затриманої детонації та наведено

оцінку впливу вибухового навантаження на ґрунт за допомогою ANSYS Explicit Dynamics.

Методи та методики дослідження. Ця робота виконана для умов міста Київ, центральної, західної і північної частин Київської області України. Найбільш поширеними типами ґрунтів у зазначеному регіоні є дерново-підзолисті ґрунти, опідзолені ґрунти і дернові ґрунти. Ці ґрунти містять глинисті і піщані частки в різних співвідношеннях.

Четвертинний покрив на глибину до 25 м представлений, як правило, лесами, суглинками, пісками, нижче яких розташовуються глини. До глибини 20 м у центральних та північних районах Київської області зазвичай зустрічаються родючий верхній шар (~0–0,5 м), алювіальні та супіщані горизонти (0,5–5 м), водно-льодовикові та озерно-льодовикові піщано-суглинні відкладення (5–12 м), флювіо-льодовикові відкладення з включенням глин, пісків та валунів (12–20 м). Піски і суглинки є породами, що найбільш часто зустрічаються.

У статті як типові породи для проведення досліджень були прийняті піски. Шар порід для моделювання було прийнято однорідним. Верхній родючий шар ґрунту ігнорувався, що, на думку авторів, припустимо з огляду на структуру ґрунтів, описану вище.

Чисельне моделювання за допомогою програмного середовища ANSYS Explicit Dynamics було основним методом дослідження. Модель ґрунтового середовища являла собою прямокутний паралелепіпед $40 \times 40 \times 15$ м.

Для нижньої та бічних граней моделі було застосовано граничну умову Impedance Boundary. Це гранична умова керує відбиттям та проходженням ударної хвилі на границях моделі. Коли ударна хвиля досягає межі області, що моделюється, хвиля не відбивається від стінки, а гаситься за межами моделі, створюючи умовно «нескінченне» середовище.

Моделювався динамічний вплив балістичної ракети на наведене ґрунтове середовище. Ракета підривалася на межі розділу двох середовищ «ґрунт – повітря», на малій відстані від вільної поверхні. Таким чином, дія вибуху проявлялась не тільки в навантаженні, руйнуванні і переміщенні з ущільненням, але й у викиданні ґрунту в бік вільної поверхні з утворенням воронки викиду. Моделювався внутрішній заряд, оскільки тип ракет, що моделювався, мав бойову частину проникаючої дії із затримкою вибуху. На практиці це дає змогу ракеті зануритись на певну глибину в ґрунт, після чого вибухнути, як під час заглибленого заряду. Кут атаки становив 90 градусів. За такого куту

атаки глибина воронки буде найбільшою, тобто в дослідженні розглядається найбільш небезпечний (несприятливий) випадок. В роботі розглядалось тільки вибухове навантаження, що утворюється в результаті впливу продуктів вибуху та ударної хвилі без урахування потоків осколків. В цьому дослідженні час затримки становив 2,5 мс.

Прототипом була північнокорейська ракета KN-23, яка має вагу бойової частини більше 400 кг, схожа за технічними характеристиками з російською балістичною ракетою «Іскандер» Такий тип ракет, за спостереженнями Defense Express, найбільш часто використовуються для ударів по Україні. Маса ракети на початку розрахунку становила 1 500 кг. Матеріал корпусу – авіаційний алюміній, 1 000 кг, вибухова речовина – TNT, 500 кг. Точка детонації (Detonation Point) розміщена всередині заряду TNT із затримкою активації, що забезпечувало відстрочений запуск вибуху після контакту ракети з ґрунтом.

Для опису процесу детонації вибухової речовини (TNT), розміщеної всередині ракети, у дослідженні використано рівняння стану Джонса-Вілкінса-Лі (JWL – Jones-Wilkins-Lee), яке є загальновизнаним підходом у моделюванні вибухових процесів в умовах високого тиску та швидкості.

Для опису механічної поведінки ґрунту за динамічного навантаження застосовано модель міцності Drucker-Prager Strength Piecewise. Це розширена модель дає змогу нелінійно описати залежність міцності від тиску шляхом введення значень, які отримані експериментально.

Вихідними даними моделі є залежності границі текучості (Па) від тиску (Па), отримані під час лабораторних випробувань порід. Підготовлені зразки випробували за схемою Кармана. Результати випробування ґрунтів за різного вологонасичення наведено на рис. 1.

Перед проведенням основних досліджень було проведено дослідження чутливості моделі задля оптимізації розмірів сітки кінцевих елементів. Сітка моделювалась рівнорозмірною. Порівняння результатів розрахунку дало змогу дійти висновку, що за довжини сторони елемента сітки 1,0 м точність розрахунку перебуває в межах 10 %, а подальше збільшення розмірів сітки недоцільне. Калібрування моделі було проведено шляхом порівняння результатів моделювання з параметрами воронки, що утворилась у реальних умовах в результаті атаки балістичною ракетою KN23 Буда-Бабинецька Бучанської громади Київської області 15 лютого 2024 року. Фото воронки і її параметри наведено на рис. 2.

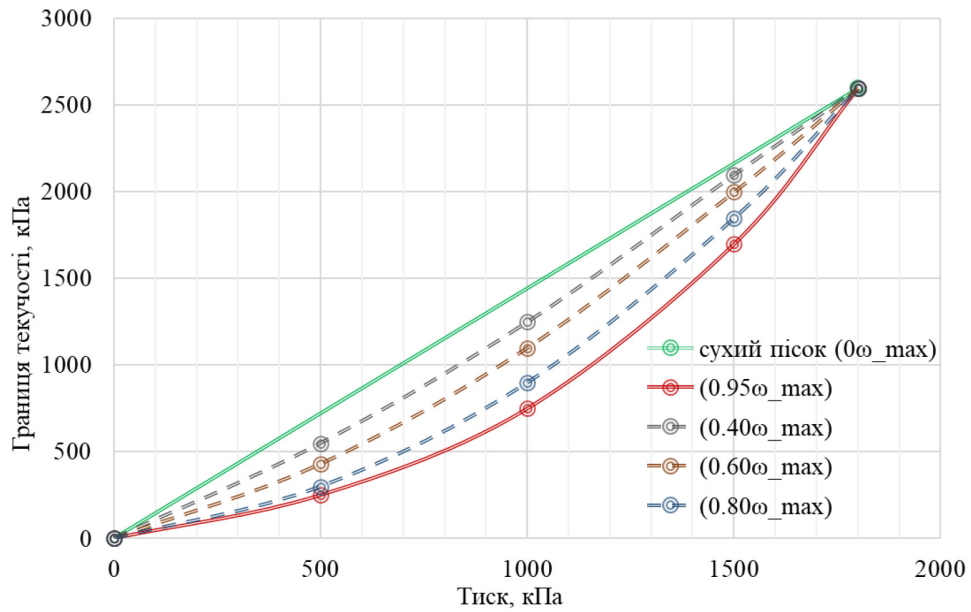
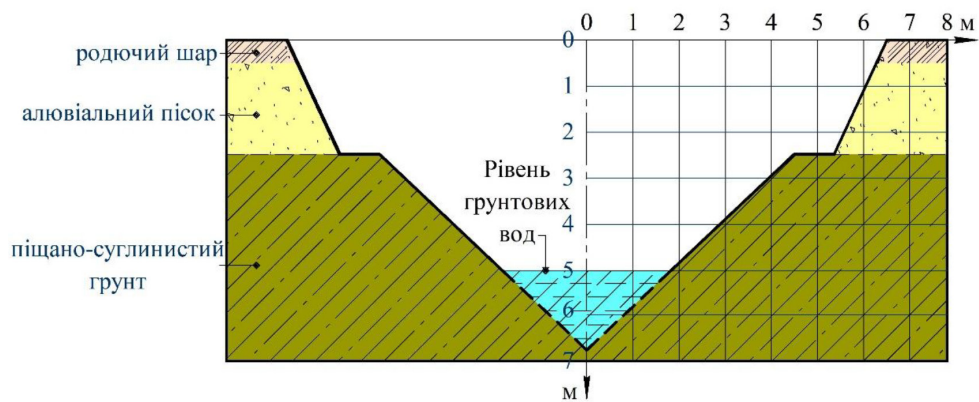


Рис. 1. Криві об'ємного деформування зразків піщаного ґрунту за різної вологості



а)



б)

Рис. 2. Фото (а) і поперечний профіль (б) воронки, що залишилась після вибуху балістичної ракети KN23

Картина розподілу еквівалентних напружень у моделі після калібрування наведена на рис. 3а. Розміри воронки, що утворюється в моделі після коригування (ширина 17,0 м, глибина 7,0 м), задовільно співпадають з розмірами воронки в натурі (ширина 16,6 м, глибина 6,8 м) (рис. 3, б). Відхилення по ширині становить +2,4 %, відхилення по глибині – +2,9 %.

Результати. Діаграми розподілу еквівалентних напружень ґрунту для сухого та вологого піску ($0,95\omega_{\max}$) показано на рис. 4. Аналіз розподілу еквівалентних напружень показує, що поле напружень симетричне до осі траєкторії ракетної атаки. Це зрозуміло, оскільки кут атаки становить 90 градусів.

Зона впливу вибухової хвилі не відрізняється суттєво для сухого та мокрого піску. Однак конфігурації цієї зони різні. Для сухого піску вибухова хвиля має максимальну амплітуду на глибині від дна вирви 2–3 м. Області максимальних напружень в ґрунті орієнтовані під кутом 45 градусів до траєкторії атаки. Максимальні напруження в ґрунті в цій зоні становлять 0,124 МПа. Другий пік ударної хвилі розташований на глибині понад 8 м від дна вирви, а напруження в ґрунті при цьому зменшуються.

Область другого піку симетрична відносно траєкторії атаки з максимумом напружень на осі траєкторії.

Для випадку мокрого піску вибухова хвиля має максимальну амплітуду на глибині 7–8 м від дна вирви. Тут формується область максимальних напружень, з максимумом 0,062 МПа, що вдвічі менше, ніж для сухого піску. Це симетрична щодо траєкторії атаки область, пов'язана з другим піком ударної хвилі. Області максимальних напружень від першого піку вибухової хвилі формуються на відстані 2–3 м від дна вирви і орієнтовані під кутом 45 градусів до траєкторії атаки.

Глибина вирви в обох випадках однакова і становить за результатами моделювання 7,0 м. Проте форма вирви і ширина у підставі відрізняються. Ширина вирви для сухого піску становить 17,0 м, а для мокрого піску – 14,0 м. Основа вирви (верхні два метри) для сухого піску значно ширша, що пояснюється майже нульовим коефіцієнтом зчеплення сухого піску. Таким чином, сухий пісок розлітається в приповерхневому шарі у більшому діаметрі. На контурі повітряної вибухової хвилі, що збігається з першим піком вибухової хвилі в ґрунті, у приповерхневому

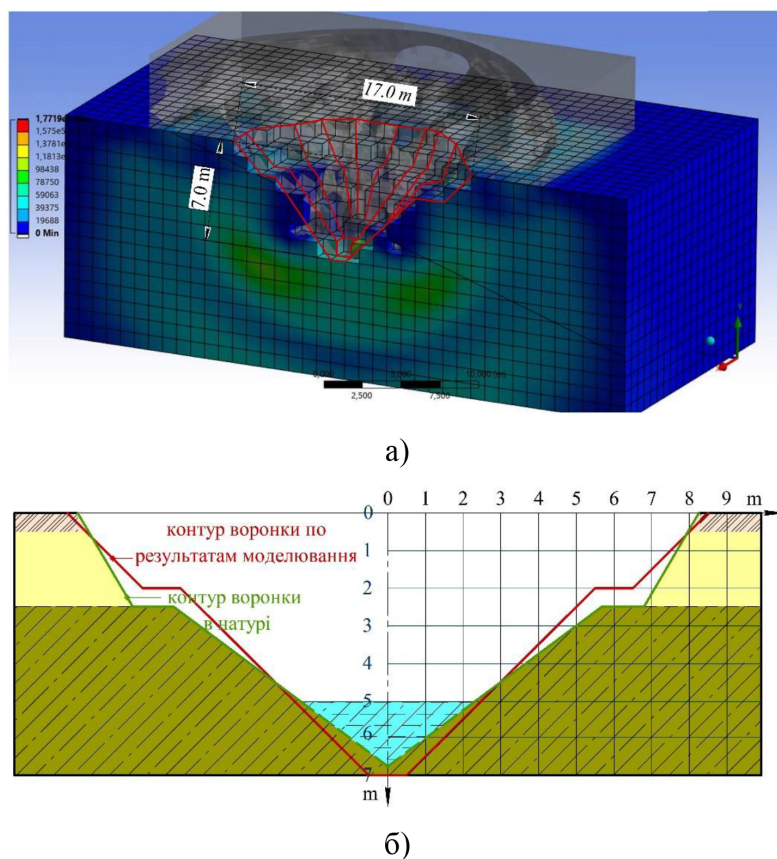
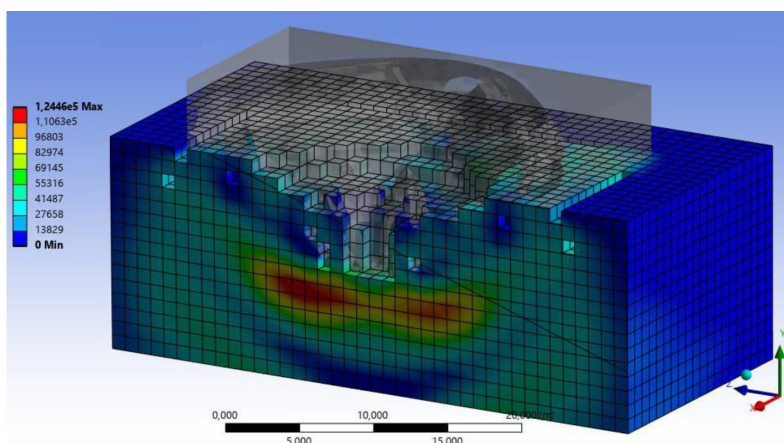
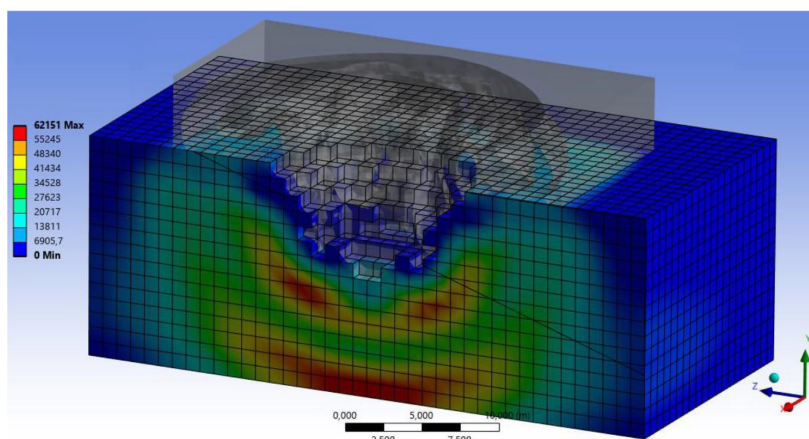


Рис. 3. Результат розрахунку тестової чисельної моделі після калібрування (а), поперечний профіль воронки, побудований після моніторингу в натурі і за результатами чисельного моделювання (б)



а)



б)

Рис. 4. Діаграми еквівалентних напружень у ґрунті для сухого (а) та вологого (б) піщаного ґрунту

шарі на відстані від осі атаки 13–14 м з цієї причини руйнується область шириною 1,0 м. У моделі Drucker-Prager Strength Piecewise параметр зчеплення враховано межею міцності на розтягування. Мокрий пісок має значно більший коефіцієнт зчеплення, що відбивається на більш компактній формі вирви витягнутої вздовж траєкторії атаки.

Залежності діаметра воронки та максимальних еквівалентних напружень в області першого піку ударної хвилі від вологості піску представлені на рис. 5.

Діаметр вирви зменшується пропорційно збільшенню вологості піску (рис. 5), що пов'язано з підвищенням зчеплення та збільшенням кута внутрішнього тертя піску під час зволоження. Максимальні еквівалентні напруження в області першого піку вибухової хвилі зменшуються прямо пропорційно підвищенню вологості піску. При цьому напруження зменшуються приблизно вдвічі за підвищення вологості від 0 % до 95 % максимального вологонасичення.

Величина напружень на піку вибухової хвилі становить 0,124 МПа для сухого піску, що менше межі міцності бетонних і металевих труб, які використовуються в комунікаційних системах. Таким чином, нижче за глибину вирви, судячи з результатів моделювання, розташовується безпечна зона для підземних комунікацій.

На рис. 6 представлено графіки пошарової зміни об'єму вирви для різної вологості ґрунту за результатами чисельного моделювання. Кожен шар має товщину 1,0 м. Таке уявлення результатів моделювання дає змогу усереднено оцінити зміну форми вирви за зміни вологості.

Прямої залежності між вологістю піску та загальним об'ємом вивернутого ґрунту не спостерігається. Так, об'єм воронки з урахуванням симетричності задачі становить 512 м³ для сухого піску та 478 м³ для мокрого. Максимальний об'єм вивернутого ґрунту становить 536 м³ для вологості $0.6\omega_{\max}$, а за вологості $0.4\omega_{\max}$ та $0.8\omega_{\max}$ – 516 м³ та 520 м³ відповідно. За вологості $0.6\omega_{\max}$ об'єм вивернутого

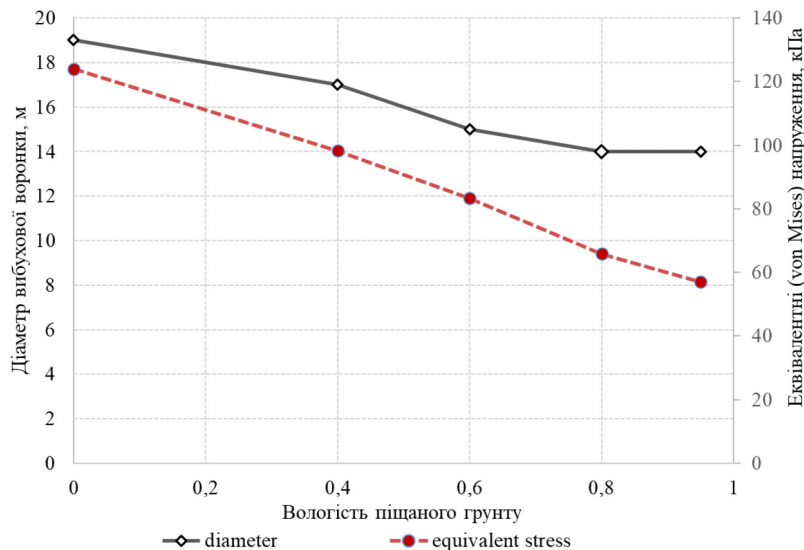


Рис. 5. Залежності діаметра воронки та максимальних еквівалентних напружень в області першого піку ударної хвилі від вологості піщаного ґрунту

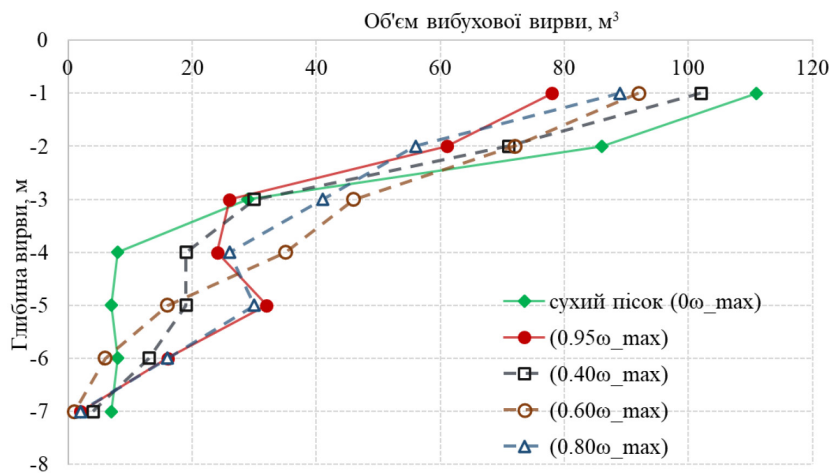


Рис. 6. Графіки пошарової зміни об'єму вирви для різної вологості ґрунту

ґрунту зменшується пропорційно глибині вирви, а вирва за формою найбільше схожа на перевернутий конус.

Зміна вологості піску як у більший, так і в менший бік призводить до зміни форми вирви та її відхилення формою від конуса. Вирва в цьому випадку найбільше схожа на поєднання кількох фігур: усіченого конуса у верхній частині вирви та одного або двох усічених конусів у нижній частині вирви. Найцікавіша тенденція зміни форми вирви на глибині 4–5 м. Для сухого піску тут спостерігається невелике зменшення об'єму вирви з глибиною, для $0.4\omega_{\max}$ об'єм не змінюється, для $0.6\omega_{\max}$ вивернутий об'єм помітно зменшується, а для $0.8\omega_{\max}$ і $0.95\omega_{\max}$ – помітно збільшується.

Як видно з рис. 6, загальна тенденція полягає в розширенні нижньої частини вирви за

збільшення вологості піску та одночасного звуження її верхньої частини. Так для сухого піску об'єм вивернутого ґрунту на глибині 4–7 м найменший з порівнюваних варіантів, а об'єм вивернутого ґрунту на глибині 3–0 м найбільший. Зворотна ситуація для вологого ґрунту ($0.95\omega_{\max}$), де на глибині 4–7 м об'єм вивернутого ґрунту найбільший, а на глибині 3–0 м – найменший з порівнюваних.

Висновки. У статті представлені результати визначення параметрів безпечної зони для розташування об'єктів критичної підземної інфраструктури (перш за все вузлів водо- та газопостачання, станцій та колекторів водовідведення) за ракетно-терористичних атак. Чисельне моделювання за допомогою програмного забезпечення ANSYS Explicit Dynamics було використано для аналізу параметрів вибухових ворон

і напружень у ґрунтовому масиві, навколо вибухових воронки. Інженерним бекграундом були геологічні умови Київської області України. В результаті були виявлені місця зон максимальних напружень в ґрунті поблизу воронки вибуху. Також була розрахована безпечна глибина розташування інженерних мереж і вузлів.

Аналіз напружень вказує на те, що максимальні напруження в ґрунті поблизу вибухової воронки переважно розташовані на відстані 2–3 м від контуру воронки. Для піщаних ґрунтів напруження, що виникають в області піку вибухової хвилі нижче вибухової воронки, менше

межі міцності бетонних і сталевих труб. Зона породи між контуром воронки і областю пікових напружень витримує понижені напруження. Таким чином, безпечна зона розташована нижче контуру вибухової воронки і може бути визначена через визначення глибини воронки.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення процесів вибухового навантаження суглінистих ґрунтів, а також лісів. Результатом майбутніх досліджень буде обґрунтування параметрів способу ефективного захисту об'єктів критичної інфраструктури від ракетних обстрілів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Edri I.E., Grisaro H.Y., Yankelevsky D.Z. TNT equivalency in an internal explosion event. *J. Hazard. Mater.* 2019. Vol. 374. P. 248–257.
2. Zuievskaya N., Vovk O., Shaidetska L., Semchuk R. Computer Simulation of the Effect of an Explosion on Critical Objects Infrastructure. *Science for Peace and Security Series – E: Human and Societal DynamicsEbook*, 2024. Vol. 157. P. 14–27.
3. Russo P., Parisi F. Risk-targeted safety distance of reinforced concrete buildings from natural-gas transmission pipelines. *Reliab Eng Syst Saf.* 2016. Vol. 148. P. 57–66.
4. Stewart M. G., Netherton M. D. A probabilistic risk-acceptance model for assessing blast and fragmentation safety hazards. *Reliab Eng Syst Saf.* 2019. Vol. 191. P. 1–10.
5. Zhai C., Chen X. Probability damage calculation of building targets under the projectile warhead strike. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2020. Vol. 202. Issue 107030.
6. Urban vulnerability under various blast loading scenarios: analysis using GIS-based multicriteria decision analysis techniques / Y. E. Ghajari та ін. *Cities*. 2018. Vol. 72. P. 102–114.
7. Luccioni B. M., Ambrosini R. D., Danesi R. F. Analysis of building collapse under blast. *Eng Structures*. 2004. Vol. 26 (1). P. 63–71.
8. Progressive collapse potential of a typical steel building due to blast attacks / H. M. Elsanadedy та ін. *Constr Steel Res.* 2014. Vol. 101. P. 143–57.
9. Cullis I. G., Schofield J., Whitby A. Assessment of blast loading effects – Types of explosion and loading effects. *Int J Press Vessels Pip.* 2010. Vol. 87. P. 493–503.
10. Progressive collapse analysis of a RC building subjected to blast loads / T.H. Almusallam та ін. *Struct Eng Mech.* 2010. Vol. 36 (3). P. 301–319.
11. Numerical modelling of square tubular steel beams subjected to transverse blast loads / H. H. Jama та ін. *Thin-Walled Struct.* 2009. Vol. 47. P. 1523–1534.
12. Mishra S., Chakraborty T., Basu D., Lam N. Characterization of Sandstone for Application in Blast Analysis of Tunnel. *Geotechnical Testing Journal*. 2020. Vol. 43 (2). P. 351–382.
13. Ma G. W., Hao H., Wang F. Simulations of explosion-induced damage to underground rock chambers. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2011. Vol. 3. P. 19–29.

REFERENCES:

1. Edri, I.E., Grisaro, H.Y., & Yankelevsky, D.Z. (2019). TNT equivalency in an internal explosion event. *J. Hazard. Mater.*, 374, 248–257.
2. Zuievskaya, N., Vovk, O., Shaidetska, L., & Semchuk, R. (2024). Computer Simulation of the Effect of an Explosion on Critical Objects Infrastructure. *Science for Peace and Security Series – E: Human and Societal DynamicsEbook*, 157, 14–27.
3. Russo, P., & Parisi, F. (2016). Risk-targeted safety distance of reinforced concrete buildings from natural-gas transmission pipelines. *Reliab Eng Syst Saf.*, 148, 57–66.
4. Stewart, M. G., & Netherton, M. D. (2019). A probabilistic risk-acceptance model for assessing blast and fragmentation safety hazards. *Reliab Eng Syst Saf.*, 191, 1–10.
5. Zhai, C., & Chen, X. (2020). Probability damage calculation of building targets under the projectile warhead strike. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 202, 107030.

6. Ghajari, Y. E., Alesheikh, A. A., Modiri, M., Hosnavi, R., Abbasi, M., & Sharifi, A. (2018). Urban vulnerability under various blast loading scenarios: analysis using GIS-based multicriteria decision analysis techniques. *Cities*, 72, 102–114.
7. Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D., & Danesi, R. F. (2004). Analysis of building collapse under blast. *Engineering Structures*, 26 (1), 63–71.
8. Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alharbi, Y. R., Salloum, Y. A. A., & Abbas, H. (2014). Progressive collapse potential of a typical steel building due to blast attacks. *J. Constr Steel Res.*, 101, 143–157.
9. Cullis, I. G., Schofield, J., & Whitby, A. (2010). Assessment of blast loading effects – Types of explosion and loading effects. *Int J Press Vessels Pip.*, 87, 493–503.
10. Almusallam, T. H., Elsanadedy, H. M., Abbas, H., Alsayed, S. H., & Al-Salloum, Y. A. (2010). Progressive collapse analysis of a RC building subjected to blast loads. *Struct Eng Mech.*, 36 (3), 301–319.
11. Jama, H. H., Bambach, M. R., Nurick, G. N., Grzebieta, R. H., & Zhao, X. (2009). Numerical modelling of square tubular steel beams subjected to transverse blast loads. *Thin-Walled Struct.*, 47, 1523–1534.
12. Mishra, S., Chakraborty, T., Basu, D., & Lam, N. (2020). Characterization of Sandstone for Application in Blast Analysis of Tunnel. *Geotechnical Testing Journal*, 43 (2), 351–382.
13. Ma, G. W., Hao, H., & Wang, F. (2011). Simulations of explosion-induced damage to underground rock chambers. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 3, 19–29.

Стаття надійшла: 02.08.2025

Стаття прийнята: 28.08.2025

Опублікована: 10.11.2025

