

ГІРНИЦТВО

УДК 624.191.242

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-28>

СПОРУДЖЕННЯ ДЕМОНТАЖНО-ЩИТОВОЇ КАМЕРИ В ІСНУЮЧОМУ СТВОЛІ

Вапнічна Вікторія Вікторівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри геоінженерії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0003-3938-4358

Вислоух Олег Сергійович,

магістрант кафедри геоінженерії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Каменець В'ячеслав Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0001-8169-2544

У статті розглядається процес спорудження демонтажно-щитової камери у межах існуючого шахтного ствола. Проаналізовані конструктивні особливості камери, розрахункова жорсткість її елементів та вплив ґрунтових умов на напружено-деформований стан конструкції. У ході дослідження визначено основні етапи підготовчих робіт, проведено оцінку характеристик легкої пилюватої глини, що дозволило встановити її вплив на стійкість та безпечність виконання робіт. Виявлено основні ризики, пов'язані з демонтажем у таких умовах, зокрема розмокання ґрунту, його набухання та можливе нерівномірне осідання конструкції. На основі результатів комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану демонтажно-щитової камери із застосуванням SCAD виконано порівняння двох типів залізобетонних обробок – збірної та монолітної. Проведено порівняльний аналіз двох методів підготовчих робіт – спорудження суцільним забоям, що забезпечує високу швидкість виконання, але потребує стабільності виробки, та спорудження незалежними забоями, що дозволяє знизити ризики обвалень, але є більш трудомістким. Результати дослідження можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо проектування та будівництва під час демонтажу щитової камери, а також для вибору оптимальних технологій та методів виконання робіт з урахуванням безпеки та ефективності.

Ключові слова: демонтаж, щитова камера, гідрогеологічні умови, інженерно-геологічні умови, глина, процес демонтажу, SCAD.

Vapnichna Viktoriia, Vysloukh Oleg, Kamenets Viacheslav. Construction of disassembly and shield chamber in the existing trunk

The article deals with the process of constructing a dismantling and shielding chamber within an existing mine shaft laid. The design features of the chamber, the calculated stiffness of its elements and the influence of soil conditions on the stress-strain state of the structure are analysed. The study identifies the main stages of preparatory work, including the development of a dismantling plan, selection of appropriate technical equipment, ventilation, drainage and implementation of safety measures. The main risks associated with dismantling in such conditions have been identified, including soil soaking, swelling and possible uneven settlement of structures. Based on the results of computer modelling of the stress-strain state of the dismantling and panel chamber using SCAD, two types of reinforced concrete finishes – precast and monolithic – are compared. A comparative analysis of two methods of preparatory work was also carried out – construction with a continuous face, which provides high speed of execution, but requires stability of the workings, and construction with independent faces, which reduces the risk of collapses, but is more labour-intensive. The research results can be used to develop design and construction recommendations for dismantling the panel chamber, as well as to select the best technologies and methods of work performance, taking into account safety and efficiency.

Key words: dismantling, shield chamber, hydrogeological conditions, engineering geological conditions, clay, dismantling process, SCAD.

Вступ. У будівництві тунелів метрополітену можуть використовуватися існуючі шахтні стволи для проведення демонтажу механізованих тунелепрохідницьких комплексів, що дозволяє ефективно використовувати інфраструктуру, зменшуючи витрати на нове будівництво та прискорюючи розбудову підземних комунікацій. Однак цей процес є складним і вимагає вирішення низки технічних і безпекових проблем [1–2].

Ключовою проблемою є недостатньо досліджений аспект взаємодії старих шахтних стволів із новими технологіями та механізмами, що використовуються в процесі демонтажу. Особливо актуальною є проблема стабільності шахтних стволів, які можуть не відповідати сучасним вимогам безпеки через їхнє старіння, зношеність або зміну фізико-механічних властивостей ґрунтів навколо них. Внаслідок цього можливі обрушення, зсуви та інші небезпеки, що створюють додаткові ризики для працівників, технічних засобів та загальної безпеки підземних робіт [3, с. 46–53].

Процес спорудження демонтажно-щитової камери в існуючому стволі гірничої споруди є складним інженерним завданням, яке потребує детального аналізу, особливо за умови, коли ствол проходить через легку пилувату глину. Враховуючи характер геологічних умов, а саме наявність глини, яка має високу схильність до осипання та зволоження, виникає ціла низка технічних та безпекових проблем. Основна складність – стабільність стінок ствола під час виконання робіт зі спорудження камери. Легкі пилуваті ґрунти характеризуються низькою міцністю та високою ймовірністю виникнення обрушень під час розкриття, що може створити додаткові небезпеки для працівників та технологічного процесу [4, с. 120–126]. Крім того, робота в таких умовах потребує застосування спеціальних технічних засобів для забезпечення безпеки і контролю за станом конструкцій [4; 5].

Іншою важливою проблемою є забезпечення герметичності та надійності конструкцій щитової камери в умовах наявності води у ґрунтах, що може призвести до додаткових ускладнень під час експлуатації об'єкта. Враховуючи специфіку гірничих робіт та різноманітність природних умов, необхідно знайти оптимальні методи для зміцнення конструкцій, застосування сучасних технологій і матеріалів для зменшення ризиків [6; 7].

Тому рішення вищезазначених проблем може потребувати глибокого розуміння геотехнічних особливостей ґрунтів, використання інноваційних методів зміцнення та точного

розрахунку навантажень на конструкції під час будівництва та подальшої експлуатації. Через це постає потреба в комплексних дослідженнях, які дозволять розробити ефективні методи для демонтажу механізованих тунелепрохідницьких комплексів, враховуючи специфіку існуючих шахтних стволів, забезпечення стабільності конструкцій та підвищення безпеки під час виконання робіт на таких об'єктах у межах розбудови інфраструктури Києва.

Зв'язок між підвищенням вимог до безпеки та ефективністю робіт у гірничій сфері є актуальним питанням, оскільки такий зв'язок враховує складність робіт за таких умов, за яких необхідно досліджувати новітні методи, техніку та технології для зведення демонтажно-щитових камер у специфічних геологічних умовах. До методів та технологій можна віднести деякі методи спорудження камер у легкій пилуватій глині та її технологію будівництва, а також зведення та спорудження демонтажно-щитових камер, де важливу роль відіграють геологічні умови легких пилуватих глин [7]. Наприклад, у роботі [8] зазначено, що для будівництва необхідно враховувати деякі умови та етапи при спорудженні демонтажно-щитової камери, які передбачають таке: дослідження з визначенням оптимального маршруту та глибини для тунелів з метою врахування інженерами таких факторів, як геологічні умови, наявна інфраструктура та бажане підключення; геотехнічні умови, де необхідно надати оцінку стану ґрунту та породи вздовж маршруту тунелю з метою розуміння складнощів та планування необхідного зміцнення; земляні роботи та облицювання, де риття тунелю відбувається за допомогою методу тунелебурильної машини (англ. TBM) або інших методів земляних робіт, коли одночасно з цим встановлюється обшивка тунелю або сегментів для зміцнення стін тунелю та запобігання обвалу (в роботі [9] наведено випадок, який описує рішення з використанням методу TBM у проєкті метрополітену, де щит TBM залишають заглибленим, який стає частиною остаточного покриття тунелю); використання захисних конструкцій для підтримки поверхні тунелю під час земляних робіт, що запобігає обваленню ґрунту переважно в міських умовах з м'яким або нестабільним ґрунтом, де щит забезпечує захисну структуру для працівників і обладнання, підвищуючи безпеку під час будівництва тунелю (прокладання щитового тунелю передбачає собою використання щита, захисної конструкції, яка підтримує поверхню тунелю під час розкопок, де щит оснащений механізмами для одночасного видалення виїмки та встановлення тунельної

опори, де інженери працюють в межах безпеки щита камери).

За останні роки з'явилося чимало нових методів та підходів щодо розробки зі спорудженням камер в таких умовах, де щити можуть забезпечити стабільність та безпеку під час проведення робіт у легких пилюватих глинах. Публікації свідчать про застосування змішаних матеріалів (наприклад, спеціальних полімерних чи армованих розчинів) для зміцнення стінок шахтових виробок. Наприклад, у роботі [10] автором розроблена методика дослідження деформативних властивостей ґрунтополімерного композиту, який утворюється ін'єктуванням у глинистий ґрунт поліуретанового матеріалу SPT з впливом статичних та динамічних навантажень.

Важливим є питання відновлення щитових тунелів у водонасичених піщаних пластах і спорудження демонтажно-щитової камери. Наприклад, автори в роботі [11] запропонували новий метод, заснований на заповненні приймальної шахти водою (заповнення на 1 м вище рівня води в пластах, що дозволяє запобігти просочуванню дрібного піску), що розглядається в якості підводного вилучення щита при балансуванні ґрунтового тиску з нульовим армуванням на прикладі тунелю метро в Тель-Авіві. Однак легка пилювата глина є одним із найбільш складних матеріалів для роботи, оскільки її схильність до просідання та високої вологості потребує вивчення механічних властивостей таких глин, які би змогли дозволити визначити найбільш ефективні способи зміцнення стінок шахти. Тому авторами в роботі [11] також згадується про те, що механічна нестабільність водонасичених піщаних шарів може зробити відновлення щита надзвичайно складною частиною будівельного процесу, що може призвести до серйозних наслідків, таких як просочування води, занесення піску та обвалення ґрунту. Одним із рішень цієї проблеми є використання техніки штучного заморожування ґрунту для забезпечення безпечної проходки великої коронки службового тунелю в пилюватопіщаному шарі, що описано в роботі [12].

Варто врахувати також гідрогеологічні та інженерно-геологічні умови під час спорудження демонтажно-щитової камери, де в існуючому стволі можуть бути присутні різні елементи, такі як пісок або глина. Одним із таких є дослідження застосування геотехнічних конструкцій у «Зеленому будівництві» на основі майданчика реконструкції Поштової площі, де в роботі [13] на основі бурових робіт та лабораторних досліджень надано характеристики 7 інженерно-геологічних елементів, серед яких є глина, суглинки

та пісок. Авторами [13] з'ясовано, що у зв'язку з інженерно-геологічними умовами майданчика будівництва та гідрогеологічними умовами (що характеризується наявністю поширеного водоносного шару) роботи належать до III категорії (складної), що пов'язано з можливістю розвитку зсувних процесів ґрунту.

Метою дослідження є розробка та обґрунтування ефективної методики демонтажу в існуючому стволі шахти з урахуванням геологічних умов, напружено-деформованого стану конструкцій та вимог безпеки.

Методи та методики дослідження. Дослідження передбачає аналіз сучасних технологій демонтажу, вибір оптимального способу виконання робіт та моделювання напружено-деформованого стану конструкцій із застосуванням програмного комплексу SCAD. Практичною частиною цього дослідження є порівняння використання збірної та монолітної залізобетонних кріплень у сталих геологічних умовах, застосування технології SPT для закріплення ґрунтового масиву над майбутньою виробкою.

Проаналізувавши інженерно-геологічні умови легкої пилюватої глини, можна сформулювати рекомендації щодо проєктування та будівництва при проведенні демонтажу щитової камери: провести детальне інженерно-геологічне обстеження ділянки для визначення рівня залягання ґрунтових вод та місцевих особливостей ґрунту; у разі необхідності застосовувати спеціальні методи зміцнення ґрунту (ін'єкційне або механічне укріплення); планування дренажних систем, що дозволить завчасно виявляти та усувати накопичення вологи в ґрунті.

Отже, організація процесу демонтажу в існуючому стволі складається з переліку підготовчих робіт, які спрямовані на закріплення ґрунтового масиву, демонтажу існуючих блоків оправи ствола, спорудження демонтажно-щитової камери (сполучення) ствола з тунелем, а також проведення робіт із демонтажу щитового комплексу [2]. Не менш важливим чинником є вибір методу виконання робіт, де акцент уваги спрямований на технологію спорудження вже існуючого ствола, геологічні та гідрогеологічні умови, розміри майбутньої виробки та інше.

Результати. Розглянемо основні методи виконання робіт, а саме спорудження суцільним забоєм та спорудження сполучення незалежними забоями за допомогою бокових виробок.

Спорудження суцільним забоєм використовується в умовах, коли потрібно швидко досягти великої глибини або створити сполучення між виробками на великій площі. Цей метод характеризується тим, що весь обсяг

робіт виконується одночасно на всій площі забою. Є ефективним у певних геологічних умовах, але потребує ретельного планування, технічного забезпечення та контрольованої стабільності стін виробки.

Насамперед породу необхідно виймати вздовж всього перетину на проєктну довжину сполучення (тобто роботи ведуться без поділу на окремі шари або ділянки, а виїмка породи відбувається одночасно по всій площі перетину камери) [2].

У міру виїмки породи зводять тимчасове анкерне кріплення в поєднанні з металевою сіткою або металевими арками (також можливе застосування тимчасової дерев'яної затяжки). Породу транспортують у ствол, вантажать пневмонавантажувачами в бадді і видають на поверхню [2].

Найбільш поширеною є схема спорудження демонтажно-щитової камери шарами зверху вниз. При цьому перетин сполучення поділяють на два-три шари, висота шару 1,8–2,5 м. Ствол поглиблюють до ґрунту верхнього шару, після чого здійснюють виїмку породи у верхньому шарі на всю довжину спорудження демонтажно-щитової камери і зводять тимчасове кріплення. Далі зводять в напрямку від забою спорудження демонтажно-щитової камери до ствола – постійне бетонне або залізобетонне кріплення. Такий підхід дає змогу зберегти стабільність камери під час демонтажу, зменшити ризик обвалення і забезпечити безпеку робітників [2].

Серед прикладів спорудження суцільним забоєм можуть бути шахтні стволи (коли потрібно пробити великий об'єм породи на глибину, де суцільний забій використовується в якості швидкої пробивки стволів), а також прохідницькі роботи на великих площах при спорудженні тунелів або великих підземних споруд, коли потрібно зробити сполучення між виробками.

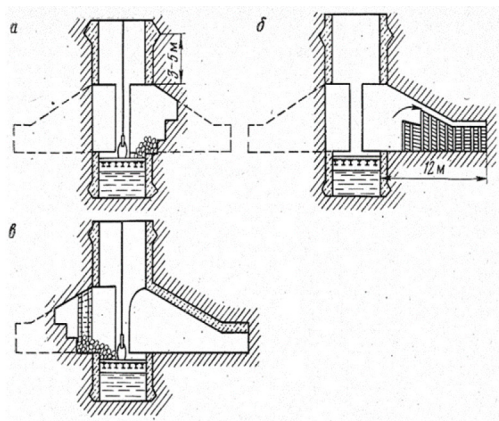


Рис. 1. Схема суцільним забоєм

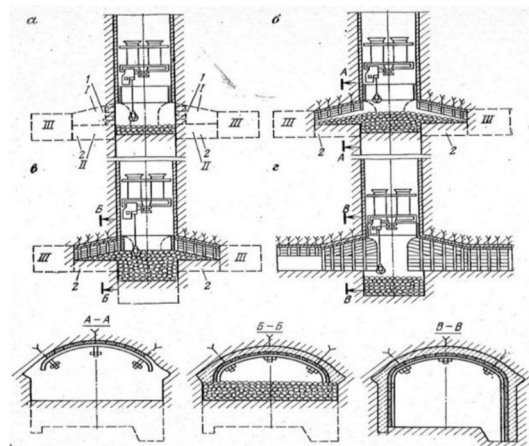


Рис. 2. Спорудження сполучення шарами де породу виймають по всьому перетину на проєктну довжину демонтажно-щитової камери

Спорудження сполучення незалежними забоями за допомогою бокових виробок (рис. 3) належить до методів виконання прохідницьких робіт в умовах порід із менш слабкою стійкістю при високому гірському тиску. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільність проходки та зменшити ризики обвалення (обвалення) під час робіт. До основних етапів цього методу можна віднести підготовчі роботи та планування, проведення бокових виробок, основну проходку через сполучення, укріплення стін та забезпечення безпеки, завершення робіт із перевіркою стабільності, контроль за підземними водами та вентиляція тощо.

Прохідницькі роботи за цією схемою здійснюються в кілька етапів. Спочатку по краях сполучення проводять бокові виробки шириною 1,8–2,0 м і висотою 2,0–2,5 м з тимчасової дерев'яним кріпленням. Потім у бокових виробках зводять бетонні стіни сполучення. Далі виймають породу в частині склепіння сполучення зі зведенням тимчасового дерев'яного кріплення, після чого встановлюють опалубку і від забою до ствола зводять бетонне кріплення в склепінні. Потім виймають породний цілик. Після цього здійснюють подальшу проходку ствола.

До виконання робіт зі спорудження демонтажно-щитової камери ґрунтовий масив біля ствола знаходиться в стані стійкої рівноваги. Його напружений стан характеризується силою тяжіння ґрунту та незначними тектонічними і температурними факторами. Після виконання робіт із розкриття виробки напружений стан переходить у двосторонній – вертикальний та горизонтальний – і супроводжується навколо контуру ствола зоною непружної

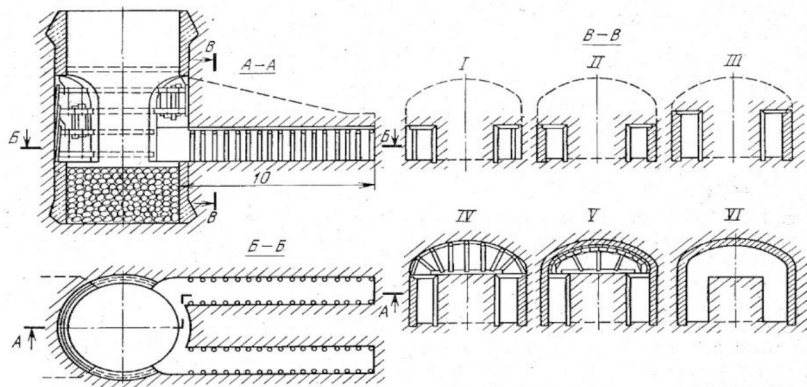


Рис. 3. Спорудження демонтажно-щитової камери незалежними забоями за допомогою бокових виробок (спосіб «обпертого ядра»)

деформації. Величина зони залежить від глибини закладання, фізико-механічних властивостей ґрунтового масиву, піддатливості тимчасового кріплення, геометричними розмірами виробки.

Розглянемо візуалізацію – 3D-модель існуючого стволу та майбутнього монтажу щитової камери, застосувавши обчислювальний комплекс SCAD (рис. 4), де також увагу буде акцентовано на схемі розподілу навантажень у демонтажно-щитовій камері (рис. 5), розрахунковій схемі жорсткості в елементах демонтажно-щитової камери залежно від навантажень (рис. 6) та деформації по осі Z у залізобетонному

монолітному кріпленні (рис. 7) та залізобетонному збірному кріпленні (рис. 8) [2].

Глибина закладання сягає 45 м, довжина майбутньої конструкції варіюється від 4 до 6 м по лівій та правій сторонам. «Демонтажно-щитова камера була розрахована за двома граничними станами. Визначено навантаження, моменти та поперечні сили, загальну стійкість споруди виконували за першим граничним станом, а розрахунок деформацій за другим граничним станом, згідно з ДБН В.2.1-10-2018 «Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення»» [14]. При визначенні методу виконання робіт кріплення бокових виробок, штольні та калотти визначається по методу проф. Протоцько з умовою можливості утворення в породному масиві самонесучого склепіння обвалення у разі достатнього

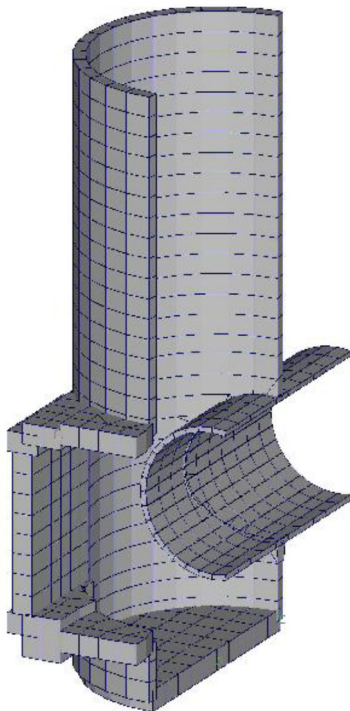


Рис. 4. Візуалізація існуючого стволу та майбутньої монтажно-щитової камери в розрахунковій програмі

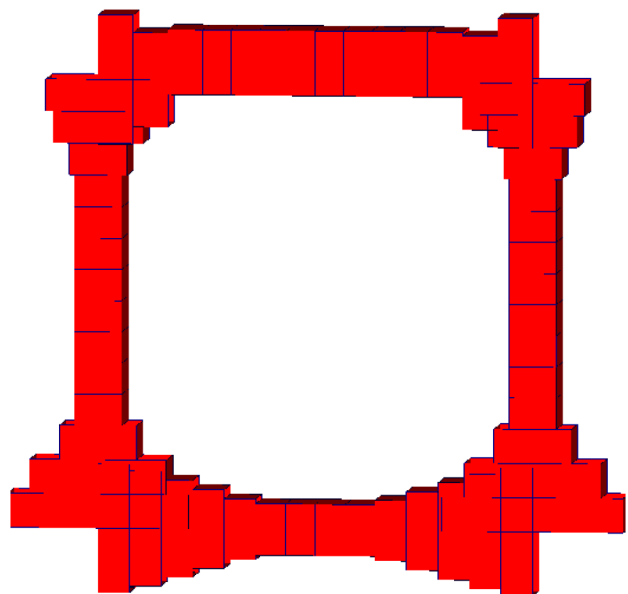


Рис. 5. Схема розподілу навантажень у демонтажно-щитовій камері

по висоті однорідного інженерно-геологічного масиву ґрунту над склепінням майбутньої виробки.

Величина навантаження приймається як вага умовно розрихленої породи в межах контуру склепіння обвалення. Навантаження на тимчасове кріплення залежить від вчасного (у процесі розробки), якомога щільнішого прилягання його до породи. З часом навантаження зменшується внаслідок «приспосовування» масиву та кріплення до нового стану силових впливів.

Розподіл навантажень відбувається на основі розрахункової схеми жорсткості елементів демонтажно-щитової камери, яка представлена у вигляді кольорової діаграми на рис. 6. Розрахункова схема складається зі структури вертикальних та горизонтальних елементів, що в сукупності формує рамну конструкцію, де елементи забарвлені у різні кольори відповідно до шкали напружень або жорсткості, яка зображена на рис. 6 праворуч. Найбільш складним етапом спорудження камери є влаштування сполучення зі стволом. Під час розкриття виробки виникають концентрації навантаження, що призводить до їх нерівномірного розподілу на кріплення (рис. 5). Виконання робіт необхідно виконувати зверху вниз. Обпирання склепіння залізобетонної конструкції з відповідною жорсткістю відбувається на верх оправи камери (рис. 6).

Кольорова шкала відображає рівень жорсткості або напружень, що змінюється: синій та зелений кольори (нижчі значення, де зони

з мінімальними напруженнями та деформаціями є незначними); жовті і помаранчеві кольори (області з підвищеною жорсткістю або напруженнями, де можуть утворюватися помітні деформації або мікротріщини, що не є критичним); червоний та фіолетовий кольори (вищі значення, які є критичними, де навантаження досягає максимальних значень, що потребує додаткового підсилення). Ця схема дозволяє оцінити розподіл напружень по конструкції й використовується для аналізу механічної поведінки конструкції під дією навантажень, що допоможе визначити найбільш напружені або слабкі місця, які можуть потребувати підсилення або корекції щодо проєктних рішень.

Далі на основі розглянутих рисунків потрібно дослідити вплив ґрунтових умов на жорсткість конструкції. Оскільки легка пилувата глина має специфічні фізико-механічні характеристики, а також гідрогеологічні та інженерно-геологічні умови (які було розглянуто раніше), можна провести таку оцінку. Легка пилувата глина має низьку несучу здатність, що може спричинити осідання конструкції, а поява нерівномірних деформацій у місцях концентрації напружень пояснюється високою пластичністю. Іншим фактором також є те, що легка пилувата глина є чутливою до змін вологості, а отже, може знижувати міцність ґрунтової основи, що може призвести до нерівномірного перерозподілу навантажень. Перелічені фактори пояснюють наявність зон із підвищеними напруженнями в нижніх частинах конструкції (фундаменти) та місцях з'єднання опор із горизонтальними елементами.

Інженерні рішення для забезпечення жорсткості враховують розрахункову схему з метою покращення експлуатаційної надійності камери, що включає в себе таке: посилення фундаментної основи за допомогою ін'єкційних розчинів або геополімерних сумішей; використання армованих конструктивних елементів для підвищення жорсткості в зонах максимальних напружень; диференційований підхід до розподілу навантажень, передбачаючи компенсаційні шви чи гнучкі з'єднання; контроль за режимом вологості ґрунту, щоб запобігти втраті його несучої здатності.

Отже, на основі перерахованих властивостей розрахункова схема жорсткості демонтажно-щитової камери демонструє характер розподілу напружень у конструкції, що дозволяє оцінити її стійкість, визначити завчасно вразливі фактори та запобігти небажаній критичній появі деформацій та максимальних значень навантаження. В умовах будівництва в існуючому стволі з легкої пилуватої глини необхідно враховувати

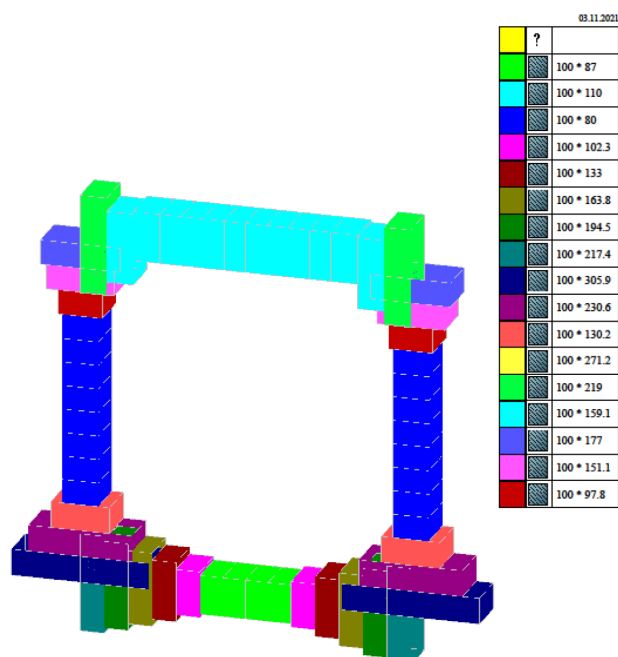


Рис. 6. Розрахункова схема жорсткості в елементах демонтажно-щитової камери залежно від навантажень

фактори осідання та пластичних деформацій, що вимагає застосування інженерних заходів із покращенням жорсткості та стабільності конструкції.

Розглянемо інший випадок, коли постійне навантаження від власної ваги ґрунтового масиву з урахуванням реального стану масиву до моменту утворення виробки слід прикладати до нього у вигляді об'ємних сил, що створюють силове гравітаційне поле, рівень напруженості якого зростає прямо пропорційно глибині відносно поверхні землі [1].

На рис. 7 представлена схема деформацій уздовж осі Z у залізобетонному монолітному кріпленні, де числові значення, які розташовані вздовж контуру конструкції, вказують на ступінь зміщення (зміни положення точок у вертикальному напрямку) або напруження в різних точках. Негативні значення можуть свідчити про осідання, тоді як позитивні – про підйом або розширення окремих ділянок. Це дозволяє визначити критичні зони конструкції, що потребують посилення або корекції.

Проведемо аналіз деформацій по осі Z у залізобетонному монолітному кріпленні (рис. 7), де вихідними даними є таке: контурна геометрія, яка представляє зовнішні границі конструкції, котрі піддаються навантаженню; числові значення біля контрольних точок, які відображають величину зміщень (деформацій) у міліметрах або іншій розрахунковій одиниці; негативні та позитивні значення вказують на напрямки зміщення, де негативні – зона просядання або стиснення, а позитивні – зона підйому або розширення; рівномірність чи градієнт змін, що дозволяє оцінити, наскільки рівномірно відбувається осідання або підйом різних ділянок конструкції.

Інженерна інтерпретація деформацій по осі Z охарактеризована такими факторами, як: власна вага конструкції (що передбачає

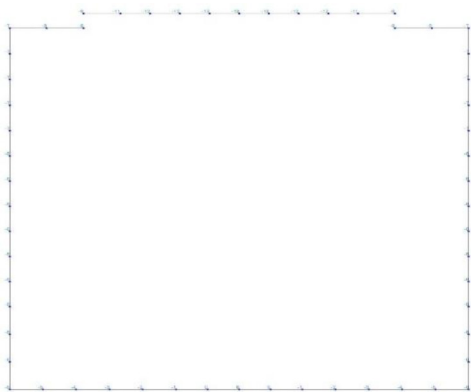


Рис. 7. Деформації по осі Z у залізобетонному монолітному кріпленні

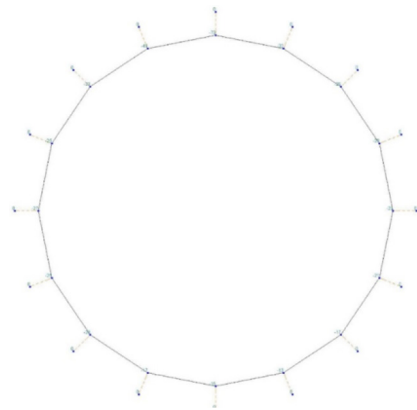


Рис. 8. Деформації по осі Z у залізобетонному збірному кріпленні

осідання верхніх ділянок); гірничий тиск (який впливає на кріплення через нерівномірне навантаження з боку порід); додаткові монтажні або експлуатаційні навантаження (які можуть спричинити перерозподіл напружень і можливе зміщення конструкції); неоднорідність геологічних умов (що може призвести до нерівномірного осідання різних частин кріплення, оскільки схильність до втрати стійкості у разі зміни вологості може вплинути на рівномірність осідання). У негативному випадку це може призвести до утворення тріщин або втрати несучої здатності через перевищення гранично допустимих значень, а також виникнення додаткових згинальних моментів і розтягувальних напружень через нерівномірне осідання. У разі, якщо деформації мають локальні пікові значення, слід перевірити якість матеріалу та зону контакту конструкції з основою.

Рис. 8 демонструє розрахункову модель деформацій по осі Z у залізобетонному збірному кріпленні під час спорудження демонтажно-щитової камери. Кільцева форма конструкції відповідає контурним межах кріплення ствола шахти, а числові значення позначають зміщення вузлів конструкції у вертикальному напрямку.

На відміну від залізобетонного монолітного кріплення збірне залізобетонне кріплення має інші механічні характеристики, які зумовлені таким: – наявністю стиків між елементами, що створює додаткові вузли можливих локальних зміщень; – різноманітністю модулів жорсткості в зонах стиків, що може спричинити нерівномірний розподіл напружень; – значним впливом ґрунтових умов (глина легка пилувата), де через можливе розуцільнення основи відбувається нерівномірне осідання сегментів.

Аналізуючи деформації на рис. 8, можна виявити декілька потенційних ризиків, які можуть бути пов'язані з: максимальними значеннями

осідання у верхніх точках кільця (приблизно 7,3 мм) і можливим нерівномірним навантаженням; нерівномірним розподілом осідань по периметру, що може спричинити появу додаткових напружень у стикових з'єднаннях сегментів; локальними піковими значеннями деформацій, що може свідчити про необхідність корекції кріплення або посилення окремих ділянок конструкції. З цією метою можуть застосовуватися деякі рекомендації щодо проектування, а саме: коригування технології монтажу збірної кріплення для забезпечення рівномірного осідання; підсилення стикових з'єднань для уникнення перевищення допустимих деформацій; застосування додаткових заходів стабілізації ґрунту з метою мінімізації просідань.

Далі проведемо аналіз двох конструктивних варіантів залізобетонної обробки шахтного ствола – збірної та монолітної. Зокрема, аналіз напружено-деформованого стану показав, що максимальна вертикальна деформація вздовж осі Z для монолітної обробки становить лише –13 мм, тоді як у збірній конструкції вона досягає –73 мм, що у 5,6 раза перевищує відповідний показник для монолітної системи. Отримані результати свідчать про вищу жорсткість, рівномірний розподіл навантажень та зменшену схильність до осідань у разі монолітної обробки, що значно підвищує її довговічність та експлуатаційну надійність. Отже, у досліджуваних геотехнічних умовах монолітна залізобетонна обробка є більш ефективним інженерним рішенням, оскільки вона забезпечує мінімальні деформації, підвищену стійкість та зниження ризиків локальних руйнувань у процесі тривалої експлуатації.

Тому на основі отриманих даних та проведеного аналізу можливо більш детально оцінити поведінку конструкції та розробити заходи для безпечного будівництва та проведення демонтажу щитової камери у шахтному стволі. Однак варто також приділити увагу стабілізації стану масиву та акцентувати увагу на забезпеченні стійкості. З цією метою для стабілізації стану масиву використовується новітня технологія нагнітання SPT, що дає можливість закріпити масив та забезпечити його стійкість [15]. Технології SPT є новітніми рішеннями в українському будівництві та ремонті ґрунтів основ, усунення причин та наслідків їх послаблення [16].

Показники ґрунту, який був досліджений в даній роботі [10], а саме суглинок з такими показниками консистенції: границя пластичності $WP = 0,2 \div 0,22$; границя текучості $WL = 0,33 \div 0,35$; число пластичності $IP = 0,12 \div 0,14$, близький за значеннями до ІГЕ 19;

границя пластичності $WP = 0,28$; границя текучості $WL = 0,5$; число пластичності $IP = 0,22$, з чого можна зробити висновок, що розчини технології SPT можна вдало застосовувати в глинистих ґрунтах.

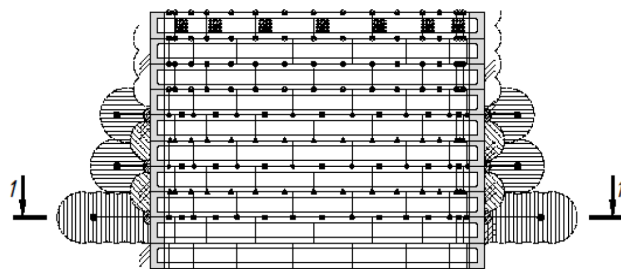


Рис. 9. Місце застосування технології SPT

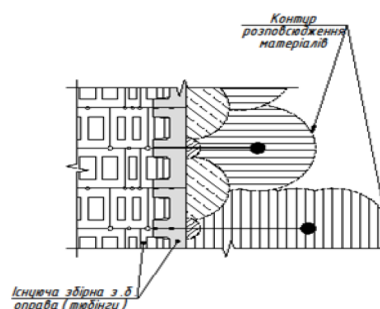


Рис. 10. Контур розповсюдження матеріалу

За допомогою полімерного матеріалу, що нагнітається (у разі застосування технології SPT) за рахунок просочення в можливі мікротріщини за наступним розривом шарів при нагнітанні та лінійному розширенні при твердінні, відбувається ущільнення прилеглого до оправи ґрунту з витісненням залишків води у верхні шари водонасичених ґрунтів (рис. 9, 10). Крім того, створений таким чином тип захисту дозволяє убезпечити від проблеми розтікання незв'язних піщаних зволжених ґрунтів навколо оправи ствола, що знаходиться вище конструкції ножового кільця, в зонах поетапного розкриття отворів оправи ствола та над щільною виробки при спорудженні демонтажної-щитової камери.

Висновки. Організація процесу демонтажу в існуючому стволі є складним завданням, яке потребує ретельного планування, оцінки геологічних умов і вибору відповідних методів виконання робіт. Для цього були визначені основні етапи підготовчих робіт, що включають розробку плану демонтажу, технічне оснащення, заходи безпеки, вентиляцію та дренаж. Крім того, проведене дослідження підтвердило важливість урахування гідрогеологічних та інженерно-геологічних умов під час демонтажу конструкцій в існуючому стволі.

Оцінка характеристик легкої пилюватої глини та її впливу на безпеку демонтажних робіт вказує на необхідність детального аналізу таких факторів, як рівень ґрунтових вод, водопроникність та можливість змінення механічних властивостей ґрунту під впливом вологи. З'ясовано основні ризики, пов'язані з демонтажем у таких умовах: це розмокання ґрунту, витікання дрібних частинок і набухання, що може призводити до обвалів, зсувів і нерівномірного осідання конструкцій. Для запобігання цим небезпекам необхідно впроваджувати комплекс заходів, зокрема ефективні дренажні системи та армування конструкцій, закріплення ґрунтів методами цементації чи хімічної обробки, а також застосування гідроізоляційних матеріалів, що сприятиме підвищенню стійкості та безпеки будівельних робіт.

У процесі дослідження розглянуто два основні методи підготовчих робіт, а саме спорудження суцільним забоем (яке забезпечує швидкість виконання робіт, але має підвищені вимоги до техніки та стабільності виробки) та спорудження незалежними забоями за допомогою бокових виробок (що дозволяє зменшити ризики обвалення, але є більш трудомістким і складним у виконанні).

Проведено аналіз напружено-деформованого стану демонтажно-щитової камери із застосуванням SCAD. Візуалізовано розподіл

навантажень та оцінено деформації в елементах конструкції. Результати моделювання підтвердили необхідність ретельного вибору методів укріплення стін ствола та використання ефективних технологій демонтажу. На основі результатів комп'ютерного моделювання було проведено порівняльний аналіз двох типів залізобетонних обробок – збірної та монолітної. Дослідження показало, що в даних геологічних умовах застосування монолітної залізобетонної обробки є значно ефективнішим. Зокрема, максимальна вертикальна деформація вздовж осі Z для монолітної конструкції становить лише –13 мм, тоді як збірна залізобетонна обробка зазнала деформації –73 мм, що майже вшестеро перевищує аналогічний показник для монолітної конструкції. Це свідчить про вищу жорсткість та стійкість монолітної обробки, що робить її більш придатною для експлуатації в досліджуваних умовах.

Також можна зробити висновок, що спосіб розкриття виробки незалежними забоями із застосуванням технології SPT дозволяє значно зменшити навантаження на кріплення виробки та уникнути ризиків, що можуть виникнути у разі використання методу розкриття виробки на повний переріз, а саме критичного збільшення навантаження на кріплення виробки, що може призвести до її деформацій та руйнування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. ДБН В.2.3-7-2018 Метрополітени. Споруди транспорту. Transport constructions. UNDERGROUNDS. (Чинний з 01.09.2019 р. на заміну ДБН В.2.3-7-2010). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82088 (дата звернення: 31.08.2025).
2. III науково-технічна конференція магістрантів ІЕЕ : збірник наукових праць ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського. Київ : ІЕЕ, 2021. 241 с. URL: https://iee.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/12/4magister_2021.pdf
3. Чепіжко О. В., Кадурін В. М., Кадурін С. В. Техногенно-геологічні системи і управління надрокористування : підручник / за ред. О. В. Чепіжко. Одеса : Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2019. 324 с. URL: <https://surl.li/awkkro>
4. Маркшейдерські роботи при будівництві шахт та підземних споруд : навчальний посібник / Г. О. Антипенко, Г. Ф. Гаврюк, В. О. Назаренко, Л. А. Ковалевич, В. В. Котенко. Житоми р: Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. 148 с. URL: <https://surl.li/ywotsa>
5. New methods for preventing crumbling and collapse of the borehole walls / Chudyk I. I., Femiak Y. M., Orynychak M. I., Sudakov A. K. & Riznychuk A. I. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2021. №. 4. P. 17–22. URL: https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2021/4/04_2021_Chudyk.pdf
6. Daramalinggam J., Annam M. K. Overcoming Geotechnical Challenges in Rail and Metro Projects Using Ground Improvement. *Geotechnics for Transportation Infrastructure: Recent Developments, Upcoming Technologies and New Concepts*. Springer Singapore. 2019. Volume 2. P. 539–556. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-6713-7_43
7. Guo H. A review of metro tunnel construction methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2019. T. 218. №. 1. P. 1–4. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/218/1/012110>
8. Constro Facilitator (2023). Construction Methods for Underground Metro Tunnels. URL: <https://constrofacilitator.com/construction-methods-for-underground-metro-tunnels/> (дата звернення: 31.08.2025).
9. A non-conventional system for TBM recovery: Abandonment of the shield and underground disassembly of the mechanical equipment and inner structures / Coto P. F., Mayans F. D., de Haro P. G., Zonghua G. &

Zhuangzhi Y. *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*. CRC Press, 2023. P. 1217–1224. URL: <https://surli.cc/nxebzf>

10. Деформативні властивості ґрунтополімерного композита: методика експериментальних досліджень / Пługін А. А., Мірошніченко С. В., Зверєва А. С. & Резніченко І. В. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 182. С. 44–52. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/921> (дата звернення: 22.12.2024).

11. Risk mitigation and construction control for effective underwater recovery of an EPB shield: a case study of the first metro tunnel in Tel Aviv / Qi W., Yang Z., Jiang Y., Liu Z., Guo Y., & Yang X. *Advances in Civil Engineering*. 2020, 2020.1:6049608. P. 1–15. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/6049608>

12. Russo A., Corbo F. Cavuoto, and S. Autuori. Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil measurements and back analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 50. P. 226–238. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779815001339?via%3Dihub>

13. Святогорів І. Застосування геотехнічних конструкцій в «зеленому будівництві». *Environmental safety and natural resources*. 2024. Т. 50. №. 2. С. 36–47. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.36-47>

14. ДБН В.2.1-10-2018 Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074244333172426323?doc_type=2 (дата звернення: 31.08.2025).

15. Zaki M. F. M., Ismail M. A. M., Govindasamy D. Correlation between SPT and PMT for sandy silt: A Case study from Kuala Lumpur. *Malaysia. Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020. Т. 45. P. 8281–8302. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-020-04684-3>

16. Роботи у ґрунтах SPT_{TM}. Каталог. Частина 1. НВП Спеціальні полімерні технології. ТУУ. 20.1-38916579-001:2013. 36. URL: https://avbmv.com.ua/images/files/SPT_Catalogue_Full_Preview%20e-mail.pdf

REFERENCES:

1. DBN V.2.3-7-2018 Metropoliteny. Sporudy transportu. Transport constructions. (2018) [Metros. Transport constructions. Transport constructions] Undergrounds. (DBN V.2.3-7-2018 From 1st September 2019). Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82088

2. III Scientific and Technical Conference of IEE Master's Students. *Collection of scientific papers of IEE. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*. Kyiv : IEE, 2021. 241. Retrieved from: https://iee.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/12/4magister_2021.pdf

3. Chepizhko, O. V., Kadurin, V. M., Kadurin, S. V., & Chepyzhko, A. V. (2019). Tekhnogenno-heolohichni systemy i upravlinnia nadrokorystuvannia [Technogenic-geological systems and subsoil use management]. Odesa : Odes. nats. un-t im. I. I. Mechnykova, 324. Retrieved from <https://surl.li/awkkro> [in Ukrainian].

4. Antypenko, H. O., Havriuk, H. F., Nazarenko, L. A., Kovalevych, L. A., & Kotenko, V. V. (2021). Marksheiderski roboty pry budivnytstvi shakht ta pidzemnykh sporud. [Surveying work in the construction of mines and underground structures] Zhytomyr : Derzhavnyi universytet "Zhytomyrska politekhnika". 148. Retrieved from <https://surl.li/ywotsa> [in Ukrainian].

5. Chudyk, I. I., Femiak, Y. M., Orynychak, M. I., Sudakov, A. K., & Riznychuk, A. I. (2021). New methods for preventing crumbling and collapse of the borehole walls. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 4, 17–22. Retrieved from: https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2021/4/04_2021_Chudyk.pdf [in Ukrainian].

6. Daramalinggam, J., Annam, M. K. (2019). Overcoming Geotechnical Challenges in Rail and Metro Projects Using Ground Improvement. *Geotechnics for Transportation Infrastructure: Recent Developments, Upcoming Technologies and New Concepts*, 2, 539–556. Retrieved from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-6713-7_43

7. GuoH.(2019).Areviewofmetrotunnelconstructionmethods.*IOPConferenceSeries:EarthandEnvironmental Science*. 218(1). 1–4. Retrieved from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/218/1/012110>

8. Constro Facilitator (2023). Construction Methods for Underground Metro Tunnels. Retrieved from: <https://constrofacilitator.com/construction-methods-for-underground-metro-tunnels/>

9. Coto, P. F., Mayans, F. D. de Haro, P. G. Zonghua, G., & Zhuangzhi, Y. (2023). A non-conventional system for TBM recovery: Abandonment of the shield and underground disassembly of the mechanical equipment and inner structures. In: *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*. 1217–1224. Retrieved from: <https://surli.cc/nxebzf>

10. Pluhin A. A., Miroshnichenko S. V., Zvierieva A. S., & Reznichenko I. V. (2018). Deformatyvni vlastyvoli gruntopolimernoho kompozyta: metodyka eksperymentalnykh doslidzhen. [Deformative properties of soil-polymer composite: experimental research methodology], 182, 44–52. Retrieved from: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/921> [in Ukrainian].

11. Qi, W., Yang, Z., Jiang, Y., Liu, Z., Guo, Y., & Yang, X. (2020). Risk mitigation and construction control for effective underwater recovery of an EPB shield: a case study of the first metro tunnel in Tel Aviv. *Advances in Civil Engineering*, 1, 1–15. DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/6049608>
12. Russo, G., Corbo, A., Cavuoto, F., & Autuori, S. (2015). Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 226–238. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779815001339?via%3Dihub>
13. Sviatohorov, I. (2024). Zastosuvannia heotekhnichnykh konstruksii v “zelenomu budivnytstvi” [The use of geotechnical structures in “green construction”]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia – Environmental safety and natural resources*, 50(2), 36–47. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.36-47> [in Ukrainian].
14. DBN V.2.1-10-2018 Osnovy i fundamentey budivel ta sporud. Osnovni polozhennia. (2018). [Foundations and foundations of buildings and structures. Basic provisions]. Retrieved from: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074244333172426323?doc_type=2
15. Zaki, M. F. M., Ismail, M. A. M., & Govindasamy, D. (2020). Correlation between SPT and PMT for sandy silt: A Case study from Kuala Lumpur, Malaysia. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(10), 8281–8302. Retrieved from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-020-04684-3>
16. Roboty u gruntakh SPTm. Katalog. Chastyna 1. NVP SPETSIALNI POLIMERNI TEKHOLOHII. (2013). [Soil works SPTm. Catalog. Part 1. NVP SPECIAL POLYMER TECHNOLOGIES.] TUU 20.1-38916579-001:2013. 36. Retrieved from: https://avbmv.com.ua/images/files/SPT_Catalogue_Full_Preview%20e-mail.pdf

Стаття надійшла: 02.08.2025

Стаття прийнята: 21.08.2025

Опублікована: 10.11.2025

