

УДК 624.1

<https://doi.org/10.33271/crpnmu/70.057>

© Н.В. Зуєвська<sup>1</sup>, О.О. Вовк<sup>1</sup>, Л.В. Шайдецька<sup>1</sup>, Е. Шукюрлю<sup>1</sup>

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

## ОСОБЛИВОСТІ СПОРУДЖЕННЯ КОЛЕКТОРНОЇ МЕРЕЖІ В СКЛАДНИХ ТОПОГРАФІЧНИХ УМОВАХ МЕТОДОМ МІКРОТУНЕЛЮВАННЯ

© N. Zuievsk<sup>1</sup>, O. Vovk<sup>1</sup>, L. Shaidetska<sup>1</sup>, E. Shukurlu<sup>1</sup>

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

## FEATURES OF THE CONSTRUCTION OF A COLLECTOR NETWORK IN DIFFICULT TOPOGRAPHIC CONDITIONS BY MICROTUNNEL

**Метою** статті було проведення розрахунку напружено-деформованого стану ґрунту під час спорудження колекторної мережі з використанням методу мікротунелювання в умовах міської місцевості в присутності зсувних зон.

**Методика**, яка використовувалась: розрахунок здійснюється за допомогою моделювання і аналізу результатів.

**Отримані результати дослідження.** За допомогою комп'ютерного моделювання в програмі Plaxis були отримані значення максимальних горизонтальних переміщень з використанням двох технологій кріплення колодязів: кріплення залізобетонними тубінгами і застосуванням для кріплення стінок колодязя ґрунтоцементних колон за технологією струменевої технології (Jet grouting). Значення максимальних горизонтальних переміщень складають відповідно 22 мм і 10 мм.

**Наукова новизна.** В статті представлені залежності форми ґрунтоцементних колон, виконаних в ґрунтах, характерних для території України, і зазначено діапазон ґрунтів, в яких найбільш ефективно застосування технології Jet grouting. Було відзначено, що у дрібнозернистих ґрунтах зовнішня поверхня колони струминного ін'єктування чітко виражена і має правильну форму. У крупнозернистих та гетерогенних ґрунтах, навпаки, поверхня неправильної форми. Встановлені залежності максимальних горизонтальних переміщень.

**Практичне значення.** Отримані розрахункові дані, використовуючи які можна оптимізувати технології кріплення та вибору технологій спорудження колодязів під час мікротунелювання залежно від топографічних та інженерно-геологічних умов на зсувонебезпечних територіях. В статті розглянуто варіант, коли струменева технологія Jet grouting застосовувалась на зсувонебезпечних ділянках не тільки як технологія кріплення колодязя, а і як технологія стабілізації схилу.

**Ключові слова:** фізико-механічні властивості, коефіцієнт запасу стійкості, ґрунтоцементні колони, струменева технологія (Jet grouting), колекторні мережі, мікротунелювання.

**Вступ.** Процес будівництва або реконструкції підземних комунікацій може ускладнюватися рельєфом м. Києва, присутністю великої кількості схилів, де можуть спостерігатися зсувні процеси, і спорудження таких мереж може призвести до порушення балансу напружено-деформованого стану і активізації зсувних процесів.

Зсувні процеси на території м. Києва обумовлені геологічною будовою правобережних схилів Дніпра, а зсувні ділянки характеризуються багатоярусною геологічною будовою, перешаруванням водопроникних, водонасичених і водотривких відкладів. Загальна площа зсувних зон складає близько 400 га, де розташовано понад 130 зсувонебезпечних ділянок, які в даний час стабілізує 33 км підпирних стінок. Інженерні протизсувні споруди почали зводитися на крутих схилах Дніпра ще в XII столітті при розбудові Києво-Печерської Лаври. Активізація гравітаційних процесів в другій половині XIX століття була викликана штучними змінами гідрологічного режиму Дніпра, інтенсивною забудовою схилів і спорудженням відповідних комунікацій та колекторних мереж [1, 2].

**Актуальність дослідження.** Виникнення і широке розповсюдження нового інноваційного обладнання дозволяє проводити будівництво і реконструкцію колекторної мережі міста на зсувонебезпечних територіях м. Києва у більш короткі терміни і з використанням сучасних європейських технологій. Однією з таких технологій, яка зараз активно використовується, є технологія мікротунелювання - це сучасна безтраншейна технологія виконання робіт з прокладання трубопроводів та комунальних трубопроводних систем, систем каналізації, водо- та теплопостачання. Ця технологія, на відміну від традиційного ведення робіт відкритим способом, не вимагає розкриття поверхні по всій трасі прокладання комунікацій, що дозволяє звести до мінімуму вплив на довкілля та збоїв в роботі транспорту та систем життєдіяльності сучасного міста. Суть технології полягає у спорудженні двох колодязів, які поєднуються тунелем утвореним прохідницьким щитом. Установка для мікротунелювання переміщується прямо у тунелі, що прокладається. Весь процес автоматизований і контролюється найсучаснішою електронікою, а нова технологія виготовлення труб гарантує їх надійність і довгий термін експлуатації (рис. 1).

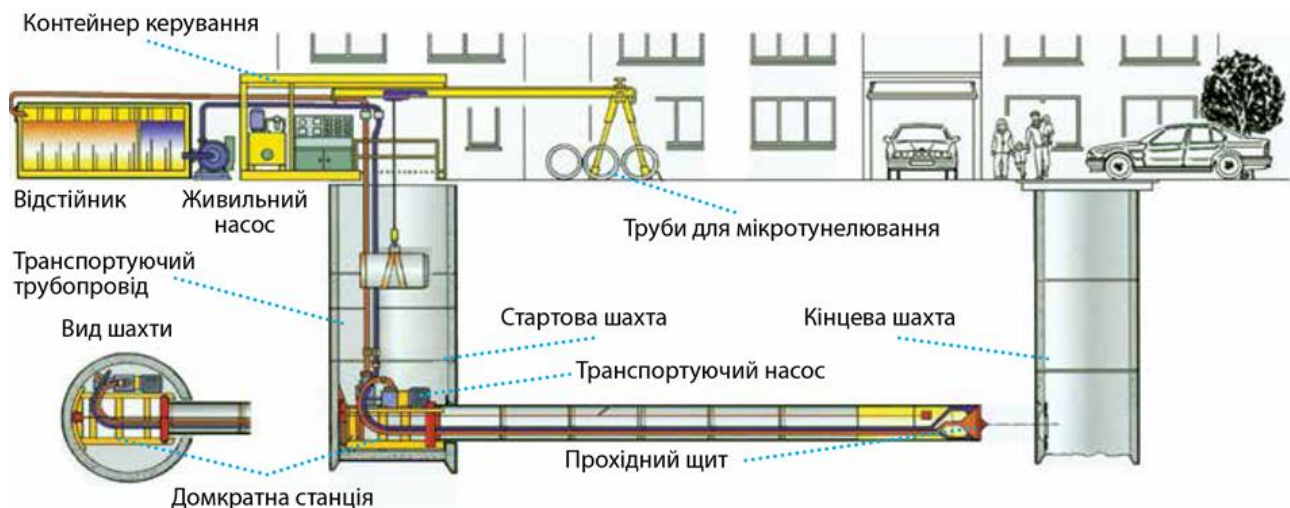


Рис.1. Принципова схема використання технології мікротунелювання в умовах міської забудови

Також, одним з ефективних і перспективних методів стабілізації схилів є використання ґрунтоцементних елементів, в роботах [3-6] запропоновані заходи з

метою підвищення стійкості схилів. Струмене́ве цементування з'явилося як альтернатива хімічному ін'єктуванню, яке було не тільки дорогим, а й не завжди ефективним методом. Розроблена та випробувана на практиці технологія покращення будівельних властивостей ґрунтів шляхом створення ґрунтоцементних елементів поширилася, насамперед, на території Сполучених Штатів Америки, Японії, Європи, потім Південної та Північної Америки, Далекого Сходу, Азії та Африки. Технологія струменевої цементації або струминного ін'єктування (Jet grouting method) – сучасна геотехнічна технологія перетворення будівельних властивостей ґрунтів з метою їх поліпшення, заснована на одночасному руйнуванні та перемішуванні ґрунту високонапірним струменем розчину в режимі "mix-in-place".

Одним із завдань поставленим авторами було провести аналіз існуючих технологій спорудження колекторних мереж та виокремлення таких, що забезпечать нормалізацію напружено-деформованого стану конструкцій і ґрунтового масиву на зсувонебезпечних територіях.

**Викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Основною ідеєю технології струменевої цементації є здійснення процесів з метою зміни характеристик ґрунтів, створення на їх основі матеріалів з необхідними властивостями та формування із зазначених матеріалів підземних елементів заданих форми та розмірів.

Основна ідея технологічних операцій при виконанні елементів струменевої цементації наступна. Спочатку проводиться попереднє буріння свердловини (D125...135 мм) з одночасним опусканням гідромонітора (рис. 2) до проектної позначки низу майбутнього елемента струминного ін'єктування. Наступним кроком проводять підключення гідромонітора до високого тиску насоса. Потім відбувається подача розчину по гнучкому рукаві до сопла монітора (d1,6...2,2 мм) під високим тиском (350-500 атм).



Рис. 2. Гідромонітор, розташований на буровій штанзі, з двома діаметрально розташованими соплами

Покрокове підняття гідромонітора відбувається з обертанням або без. Розмив ґрунту струменем розчину (у межах радіуса розмиває дії струменя) та формування елемента циліндричної форми, заповненої ґрунтоцементною сумішшю. Або підняття гідромонітора без обертання та формування плоскої панелі із ґрунтоцементу. Потім відбувається винесення частини розмитого ґрунту з відпрацьованим розчином на поверхню у вигляді пульпи по зазору між стінками свердловини та інструментом та направлення її у пульпоприймач. Залежно від кількості потоків рідини, що беруть участь у процесі формування струминно-цементацийних елементів, технологія поділяється на однокомпонентну, двокомпонентну та трикомпонентну струминну цементацию.

Однокомпонентний метод струменево-цементацийної технології полягає в тому, що і руйнування та цементация ґрунту відбувається за допомогою цементного розчину, що подається під високим тиском (кілька десятків МПа) в єдиному потоці через насос до струминного монітора. На виході з монітора швидкість струменя розчину зменшується дуже швидко, руйнівна ефективність однокомпонентного (простого) струменя у напрямку від осі свердловини обмежена, "радіус дії" простого струменя в ґрунті дорівнює кільком десяткам сантиметрів. В результаті обробки ґрунту однокомпонентним струменем формується колона від 0,4 до 1,4 м у діаметрі (рис. 3).

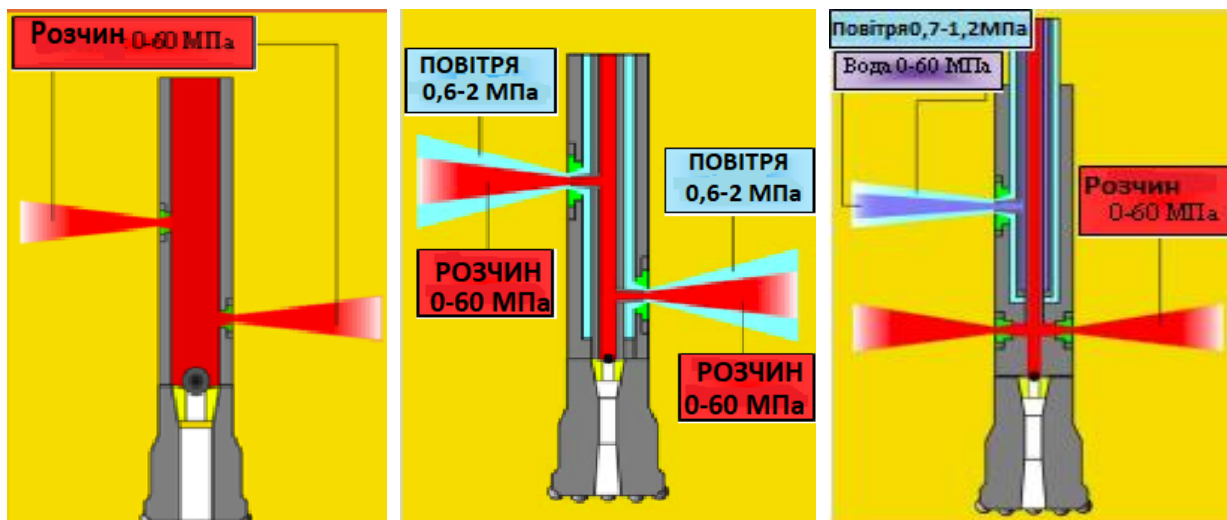


Рис. 3. Принципова схема однокомпонентної, двокомпонентної та трикомпонентної струминної цементациї

У двокомпонентній технології існує два методи: перший – руйнування та цементация ґрунту відбувається за допомогою двох рідин, які транспортуються окремо один від одного до монітора, другий – руйнування та цементация ґрунту виконується за допомогою однієї рідини, оточеної потоком повітря, рідина та повітря так само подаються до сопла окремо.

У двокомпонентній технології ґрунт руйнується за допомогою струменя води під високим тиском, що подається у верхню частину монітора, тоді як цементування відбувається за допомогою відокремленого струменя розчину під

низьким тиском, поданого в нижню частину монітора. Руйнування і цементация ґрунту, так само як і в однокомпонентній технології, відбуваються за допомогою струменя розчину, поданому під тиском в кілька десятків МПа, але функції розмиву струменя розчину допомагає кільцеподібний струмінь повітря, що подається окремо під низьким тиском з компресора до монітора. Струмінь стисненого повітря підтримує швидкість струменя розчину з видаленням від сопла. Передбачається, що вона створює оболонку навколо струменя розчину та захищає від тертя.

Суть трикомпонентної технології полягає в тому, що руйнування та цементация ґрунту відбувається за допомогою трьох потоків (вода, повітря та розчин), що подаються до монітора окремо. Так само як і в двокомпонентній технології з водою, ґрунт руйнується за допомогою струменя води під високим тиском, а цементация відбувається струменем розчину, що подається під низьким тиском, і так само як і при двокомпонентній технології з повітрям для ефективності руйнування.

Тип і фізико-механічні властивості ґрунтів, в яких виконується струменево-цементацийний елемент, будуть одними з основних факторів, що впливають на геометричний розмір елементів та міцнісні характеристики ґрунтоцементного матеріалу.

В роботі [4] представлений діапазон ґрунтів, в яких найбільш ефективно застосування такої технології. У дрібнозернистих ґрунтах зовнішня поверхня колони струминного ін'єктування чітко виражена і має правильну форму. У крупнозернистих та гетерогенних ґрунтах, навпаки, поверхня неправильної форми (рис. 4).



Рис. 4. Ґрунтоцементні колони, виконані на території України: а) в супісках; б) техногенні ґрунти – шлаки доменного виробництва; в) заторфований суглинок

За наявності моніторингового обладнання на буровій установці не складно виконувати ґрунтоцементні елементи з різними кутами заповнення (рис. 5, а...в). Технологія створення сегментних колон полягає в тому, що гідромонітор з одним соплом піднімається покровоно і виконує поворот області заданого кута (по типу маятника).

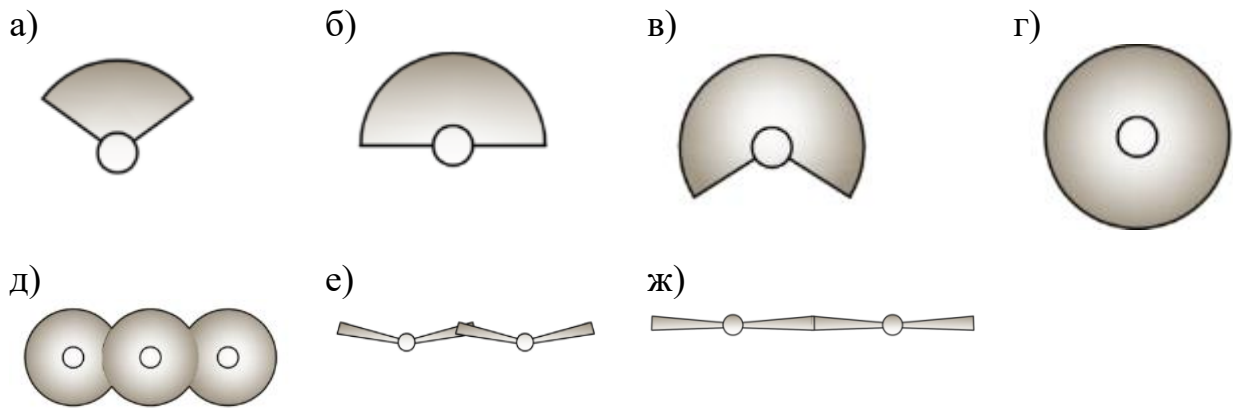


Рис. 5. Струменево-цементацийні елементи: а) у формі сегмента; б) і в) неповне коло; г) круглого поперечного перерізу; д) конструкція з круглих елементів, що січуться

При покроковому піднятті монітора з двома діаметрально розташованими соплами без його обертання в ґрунтовому масиві формується плоска панель з половиною довжини рівної радіусу струменя, що розмиває. Панель може мати V-подібну форму в плані з утворенням тупого кута  $120-150^{\circ}$  або з кутом  $180^{\circ}$  як показано на рисунку 5, (е, ж). Довжини плоских панелей, створених таким чином, можуть досягати 4 м.

При виконанні ґрунтоцементних колон з крок менше ніж їх діаметр (див. рис. 5, д) виходить конструкція з надсіченими колонами, що застосовується при спорудженні протифільтраційних бар'єрів або огороження котловану.

Основними робочими параметрами технології струминної цементациї є: швидкість підняття гідромонітора і швидкість його обертання, тиск розчину, що нагнітається, і його щільність, витрата розчину, діаметр і кількість сопел. Всі ці параметри впливають на кінцевий результат (діаметр і розміри струминно-цементацийних елементів, характеристики міцності ґрунтоцементного матеріалу).

В статті розглянуто випадок, коли проводилось мікротунелювання на схилі в міських умовах і складність полягала в тому, що необхідно було попереднє укріплення колодязів для стабільного встановлення щита. Конструкція кріплення і способи споруди стартових і прийомних шахтних стволів (колодязів) призначаються в залежності від інженерно-геологічних умов ділянки будівництва і повинна розраховуватися з урахуванням сприйняття гірського, гідростатичного тиску і тимчасового навантаження, а також на максимальне зусилля домкратної станції при мікротунелюванні. Стартовий шахтний ствол (котлован) повинен мати залізобетонне днище і опорну плиту з боку задньої торцевої стіни, розраховану на зусилля домкратів при продавлюванні труб. Передня стіна шахтного стовбура (котловану) повинна мати отвір для введення щитової мікромашини в ґрунтовий масив.

Спосіб спорудження стартових і прийомних шахтних стволів (котлованів) слід призначати в залежності від глибини їх залягання, форми, розмірів і інженерно-геологічних і містобудівних умов ділянки будівництва. Для спорудження шахтних стволів (котлованів) можуть застосовуватися: гірничий спосіб з використанням рамного кріплення, залізобетонних блоків або чавунних тубінгів;

спосіб опускного кріплення, в тому числі з використанням бентонітової сорочки; влаштування «стіни в ґрунті» з буропересічних і/або ґрунтоцементних паль; механізовані стволопрохідницькі комплекси. Останнім часом дуже часто використовується кріплення залізобетонними тубінгами. Цей метод має ряд переваг, основна з яких це швидкість будівництва.

Але в нашому випадку, враховуючи складний топографічний рельєф місцевості, хотілось би проаналізувати методику спорудження колодязів з одночасною стабілізацією схилу. Тому пропонується розглянути варіант з застосуванням для кріплення стінок колодязя ґрунтоцементних колон за технологією струменевої технології. Колони влаштовуються діаметром 600 мм з пересіченням в 150 мм, висотою відповідно до проектних розмірів (див. рис. 5, д). Необхідно мати на увазі, що при виконанні колодязів з взаємо пересічних ґрунтоцементних колон з внутрішньої частини колодязя виконується бетонне покриття (рис. 6).

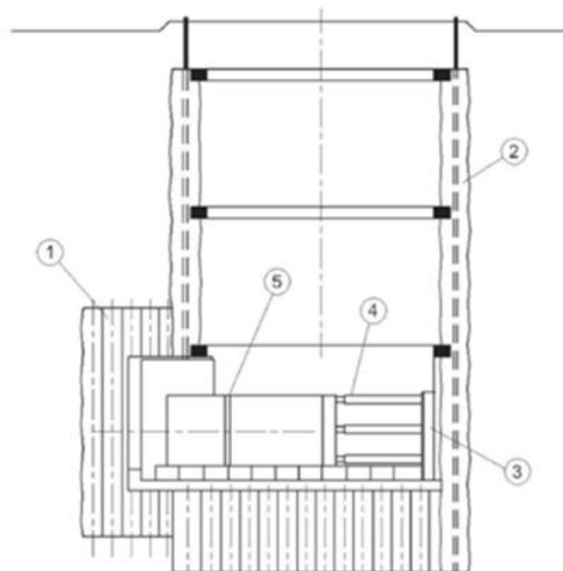
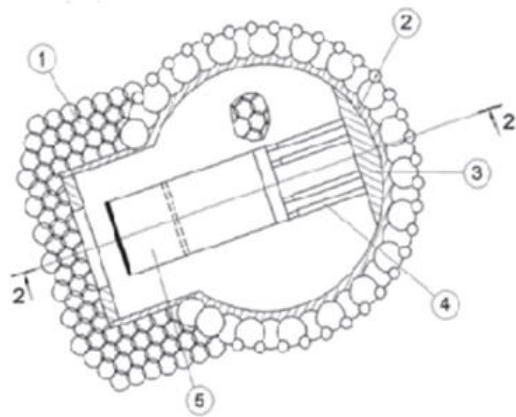


Рис. 6. Влаштування стартового котловану (стовбур, колодязь): 1 – закріплення ґрунту ґрунтоцементними колонами; 2 – огороження шахтного стовбура (ґрунтоцементна колона + бетона стіна); 3 – упорна плита; 4 – домкратна станція; 5 – мікрощит

Основою задачею порівняльного моделювання полягає в дослідженні зусиль, що виникають в конструкціях колодязів, виконаних різними методами, і оцінкою доцільності використання технології струменевої цементації при спорудженні колодязів колекторної мережі в складних топографічних умовах де спостерігаються процеси активної ґрунтової деформації.

При створенні моделі в розрахунок були введені три колодязя в зоні концентрації найбільших та найменших гравітаційних навантажень із попередньо спорудженою підпірною стінкою між К3 та К2 (К3, К2, К1 відповідно з абсолютними відмітками 121,3, 116,65 та 116,23) з виконаними з'єднувальними трубами з залізобетону для мікротунелювання ТС 120.30.5М. Вся довжина ділянки реконструкції мережі не введена в зв'язку з її великою протяжністю (430 м). Колодязь К3 розташовується у зоні найбільших гравітаційних навантажень від вище розташованого схилу, а ділянка між К2 та К1 прямолінійна (рис. 7).

Аналіз оцінки ефективності застосування запропонованої методики буде здійснюватися з використанням геотехнічного комплексу Plaxis. Під час моделювання була обрана пружно-пластична модель Мора-Кулона яка включає в себе п'ять вхідних параметрів: модуль Юнга (E), коефіцієнт Пуассона ( $\nu$ ), зчеплення (c), кут тертя ( $\phi$ ) і кут ділатансії ( $\psi$ ).

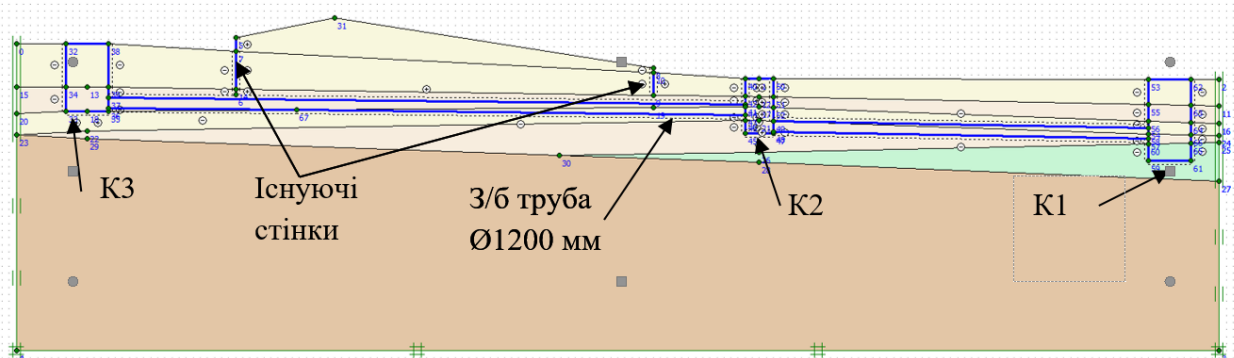


Рис. 7. Розрахункова схема

Початкові умови ґрунту представлені в таблиці 1, початкові умови для моделювання тубінгів і j-паль представлені в таблицях 2, 3.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтів

ID	Name	Type	$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$k_x$ [m/day]	$k_y$ [m/day]	$\nu$ [-]	$E_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi$ [°]	$\psi$ [°]
1	2-al-deluv supisok	Drained	17.5	182.0	0.3000	0.3000	0.33	10000.0	11.0	15.0	0.0
2	3-al-deluv suglynok	Drained	18.2	18.8	0.0300	0.0300	0.35	12000.0	27.0	17.0	0.0
3	4-pisok pyluv	Drained	18.0	19.7	3.0000	3.0000	0.30	28000.0	2.0	31.0	1.0
4	15-naglynok	Drained	19.7	19.7	3.0000E-3	3.0000E-3	0.40	47000.0	19.0	19.0	0.0



Таблиця 2

Характеристики матеріалів розрахункових елементів за першим варіантом та другим варіантом

Material data sets - Plates						
ID	Name	Type	EA [kN/m]	EI [kNm <sup>2</sup> /m]	w [kN/m <sup>2</sup> ]	v [-]
1	isn.stinka	Elastic	1.625E8	3.3854E6	3.5	0.18
2	stv.tubing	Elastic	8.125E7	4.2318E5	4.0	0.18
3	z/b tr 1.2m	Elastic	4.875E7	91406.0	2.4	0.18

Material data sets - Plates						
ID	Name	Type	EA [kN/m]	EI [kNm <sup>2</sup> /m]	w [kN/m <sup>2</sup> ]	v [-]
4	jet element	Elastic	1.14E8	3.42E6	9.6	0.18

В результаті моделювання за двома варіантами виконання стартових колодязів акцентувалася увага на горизонтальних переміщеннях, які занесені до таблиці 3.

Таблиця 3

Розрахункові зусилля в елементах конструкцій колодязів

Варіант моделювання	Номер колодязя	Макс. гориз. переміщення, мм
Застосування конструкції колодязя з з/б тубінгами	K1	8,8
	K2	5,1
	K3	21,9
Використання ґрунтоцементних колон і бетонування для конструкції колодязя	K1	14,9
	K2	4,9
	K3	10,9

Результати моделювання представлені у вигляді діаграми для всіх трьох колодязів (рис. 8).

Аналізуючи отримані результати, треба враховувати, що згідно з будівельними нормами, зсув стиків залізобетонних кільців не повинен перевищувати 20% товщини стінки, але не більше 10 мм, якщо інші норми не обґрунтовані проектом. Тому технологію, яка передбачає кріплення колодязя залізобетонними тубінгами, ми не рекомендуємо використовувати в колодязі К3. Тут треба використовувати технологію, яка здатна стабілізувати гравітаційні навантаження від схилу і тим самим знизити можливі максимальні горизонтальні переміщення.

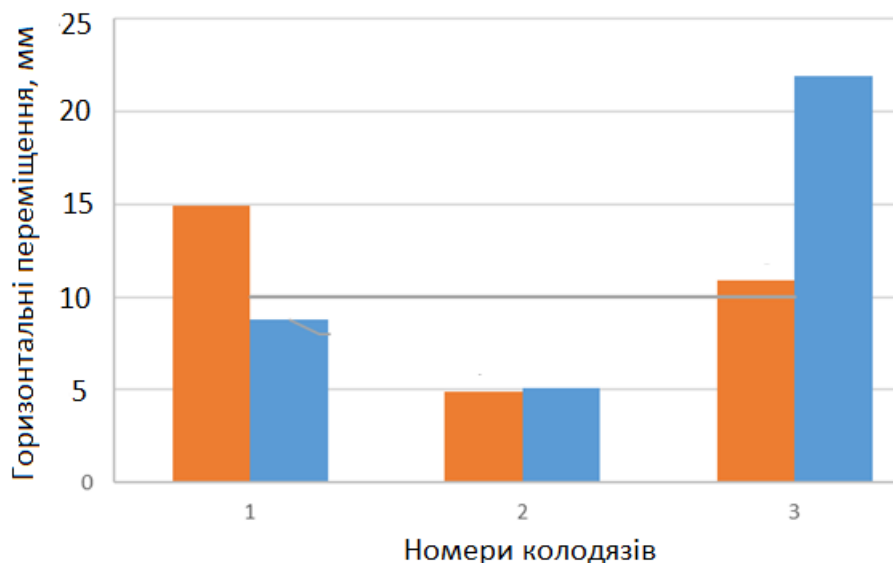


Рис. 8. Діаграма розподілу максимальних горизонтальних переміщень колодязів на зсувонебезпечній ділянці

### Висновки.

В результаті використання технології Jet grouting в умовах схилів, в яких можливі процеси ковзання, нам вдалося стабілізувати конструкцію колодязів і зменшити максимальні горизонтальні переміщення.

Особлива увага приділялася колодязю К3, який розташовується у зоні найбільших гравітаційних навантажень від вище розташованого схилу. Ділянка між К2 та К1 прямолінійна і зсувні процеси стабілізовані існуючими стінками.

В результаті моделювання було встановлено, що використання Jet-pali з бетонуванням для конструкції колодязя в порівнянні з застосуванням конструкції колодязя з залізобетонними тубінгами в 2 рази зменшило максимальні горизонтальні переміщення з 22 мм до 10 мм.

### Перелік посилань

1. Kaliukh, I., Lebid, O., Chala, O., Kryvoruchko, A., & Zuievskaya, N. (2021). Impact of low frequency dynamic loading on structural health of existing reinforced concrete railway retaining walls in the foothills of the Carpathians. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021»*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3046>
2. Zuievskaya, N., Gubashova, V., & Korobiichuk, V. (2021). Modeling of the effect of a high-pressure jet of cement mortar on the surrounding soil environment when performing jet grouting columns using jet technology. *E3S Web of Conferences*, 280, 03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128003001>
3. Зуєвська, Н.В., Стовпник, С.М., & Денісова, Л.В. (2013). Конструктивні рішення геотехнічних проблем технології мікротунелювання. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений»*. Сб. научн. трудов, 19, 240-243.
4. Загоруйко, Є. А. (2014). Вплив системи ґрунтоцементних елементів на розвиток пластичних деформацій у зсувному масиві. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 1-2, 133-138. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vdgi\\_2014\\_1-2\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vdgi_2014_1-2_22)

5. Зуєвська, Н. В., Шайдецька, Л. В., & Губашова, В. Є. (2020). Вплив виконання елементів струменевої цементації на фізико-механічні характеристики навколишнього ґрунтового масиву. *Науковий Журнал "Енергетика: Економія, Технології, Екологія"* 4, 27–34. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2019.200474>
6. Зуєвська, Н. В., Шайдецька, Л. ., & Губашова, В. Є. (2020). Перспективи застосування струменево-цементаційного закріплення ґрунтових основ. *Геоінженерія: Науково-Технічний Журнал.*, 3, 13–19. <https://doi.org/10.20535/2707-2096.3.2020.219322>

#### ABSTRACT

**The purpose** of the article was to calculate the stress-strain state of the soil during the construction of a collector network using the microtunnel method in urban areas in the presence of shear zones.

**The methods.** The calculation is carried out using modeling and analysis of the results.

**Findings.** The values are respectively, using computer modeling in the Plaxis program, the values of maximum horizontal movements were obtained using two technologies for fastening wells: fastening with reinforced concrete tubings and the use of prime-cement columns for fastening the walls of the well using jet technology (Jet grouting). The values of the maximum horizontal movements are 22 mm and 10 mm, respectively.

**The originality.** The article presents the dependence of the shape of soil-cement columns made in soils characteristic of the territory of Ukraine, and indicates the range of soils in which Jet grouting technology is most effectively used. It was noted that in fine-grained soils, the outer surface of the jet injection column is clearly expressed and has the correct shape. In coarse-grained and heterogeneous soils, on the contrary, the surface is irregular in shape. The dependencies of the maximum horizontal movements are set.

**Practical implementation.** The calculated data were obtained, using which it is possible to optimize the technologies of fastening and the choice of technologies for the construction of wells during micro-tunneling depending on the topographic and engineering-geological conditions in landslide areas. The article considers the option when Jet grouting jet technology was used in landslide areas not only as a well fastening technology, but also as a slope stabilization technology.

**Keywords:** *physical and mechanical properties, stability reserve coefficient, prime cement columns, jet technology (Jet grouting), collector networks, micro-tunnels.*