

УДК 624.19

ВПЛИВ ВИБОУ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН БІЛЯ ПРОТЯЖНОЇ ВИРОБКИ ПІД ЧАС ЇЇ ПРОВЕДЕННЯ

Доктор технічних наук Айвазов Ю.М.

Розглянуто вплив вибою на деформацію протяжної гірничої виробки при будівництві тунелів.

A case the influence of the face on the deformation of the extended mining working in the time of tunneling.

Врахування впливу торцевих ефектів у задачах механіки відноситься до найбільш складних та найменш вивчених питань. Застосування відомого принципу Б. Сен-Венана дозволяє у ряді випадків виконати розрахунок лінійно протяжної конструкції або споруди у цілому і оцінити її напружено-деформований стан на достатньому віддаленні від торців. Як правило, такий підхід для більшості механічних задач виявляється у значній мірі практично обґрунтованим та виправданим. Разом з тим, на практиці виникають і такі задачі механіки для областей та конструкцій, де торцева концентрація напружень має підвищену значимість через те, що вона визначає напружено-деформований стан досить значної, не рідко найбільш відповідальної частини споруди або конструкції. Як вже зазначалося, формування напруженого стану оправи лінійно протяжної підземної споруди і породного масиву навколо неї за суттю здійснюється під час проведення виробки саме біля її торця — у зоні вибою. Звідки напрашується висновок про те, що достовірна та надійна оцінка геомеханічних явищ, пов'язаних з будівництвом такої підземної споруди, є неможливою без врахування наявності вибою та його просування під час проходки.

На підставі тільки що зазначеного механічні збудження біля вибою протяжної виробки можуть бути врахованими наближено, з використанням дещо спрощених, але виправданих у практичному сенсі передумов та припущень. *Перше* з цих припущень полягає у тому, що плоский напружено-деформований стан (плоска деформація), який визначається на підставі вирішення граничної задачі для поперечних перерізів виробки у пружньо-міттевій постановці вражається дійсним, але всі компоненти цього стану помножуються на деякий корелюючий коефіцієнт, який враховує відстань перерізу, що розглядається, від конкретного поточного положення вибою. Тобто, якісний бік розподілу компонентів плоского напружено-деформованого стану зберігається, але у кількісному сенсі рівень всіх згаданх компонентів змінюється вздовж протяжної виробки прямо пропорційно тільки що зазначеному коефіцієнту. Згідно з *другим* припущенням вважається, що вплив вибою та його просування при проведенні виробки, а тобто і величина зазначеного вище корелюючого коефіцієнту, у практичному сенсі досить не суттєво залежать від форми поперечного перерізу виробки. Саме друге припущення надає можливість використати рішення осесиметричної задачі теорії пружності [1] (Трентер) (рис. 1), що визначає компоненти напружень та переміщень біля нескінченної кругової циліндричної порожнини радіуса R в пружному середовищі, яка знаходиться під впливом поясного розподіленого рівномірно по контуру згаданої порожнини навантаження p , що прикладається на обмеженій ділянці довжиною $2c$ вздовж порожнини. Згідно з цим рішенням радіальне переміщення поверхні порожнини $U_z(p)$ у довільному перерізі, на відстані z від середини ділянки завантаження, визначається формулою

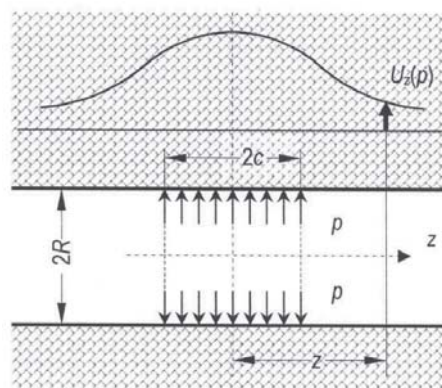


Рис. 1. До визначення переміщень поверхні циліндричної порожнини від дії поясного навантаження

$$U(p) = \frac{4(1-n^2)pR}{pE} \int_0^{\infty} \frac{\sin(c\omega)\cos(z\omega)d\omega}{\left\{ \omega \left[2(1-n) + R^2\omega^2 \left[1 - \frac{K_0^2(R\omega)}{K_1^2(R\omega)} \right] \right] \right\}}. \quad (1)$$

В залежності (1) $K_0(R\omega)$, $K_1(R\omega)$ — модифіковані функції Бесселя другого роду (функції Макдональда) аргументу $R\omega$ відповідно нульового та першого порядків [2], ν — коефіцієнт Пуассона породного середовища.

При прикладанні навантаження p , рівномірно розподіленого по всій довжині нескінченної циліндричної порожнини ($c \rightarrow \infty$), з (1) випливає відома формула для плоскої деформації нескінченної площини з круговим навантаженням рівномірними радіальним напруженням p отвором:

$$U^0(p) = \frac{(1+n)pR}{E} = \frac{pR}{2G}. \quad (2)$$

На рис. 2 наведені графіки залежності відносного переміщення поверхні виробки $U_z(p)/U^0(p)$ від відстані z до її довільного поперечного перерізу при різних значеннях коефіцієнту Пуассона породи n , обчислені за формулою (1) з урахуванням (2). При цьому прийнято, що виробка має радіус окреслення $R = 5$ м, а довжина ділянки завантаження $2c = 4$ м. Формулі (1) доцільно надати більш компактного та зручного вигляду. Для цього слід врахувати, що на практиці проходка протяжної виробки здійснюється окремими технологічними заходками, які послідовно розкриваються шляхом розробки та вдалення породи. При цьому глибина заходки w згідно з сенсом згаданої формули повинна дорівнювати $2c$ — величині ділянки, з якої знімаються під час розробки породи напруження p , що існували в масиві на контурі майбутньої виробки. Також є сенс перейти у (1) до відстаней, віднесених до умовного (усередненого) розміру поперечного перерізу виробки R , а також замінити на з іншу змінну інтегрування ω , тобто, виконати в формулі (1) зрозумілі підстановки:

$$c = \frac{wR}{2}, \quad z = L_z R, \quad R\omega = \eta, \quad d\omega = \frac{d\eta}{R}, \quad (3)$$

w — вже згадана відносна глибина технологічної заходки, L_z — відносна відстань від середини нульової заходки, яка розкривається, до довільного поперечного перерізу порожнини. Крім того, доцільно замінити модуль поздовжньої пружності породи E на її модуль зсуву G та згідно з (2) винести у вигляді множника величину $U^0(p)$.

На підставі усього зазначеного вище вихідна формула (1) набуває простішого та більш та зручного для практичної реалізації вигляду:

$$U_k(p) = U^0(p) \frac{4(1-\nu)}{p} I(n, w, k), \quad (4)$$

де

$$I(n, w, k) = \int_0^{\infty} S(n, \eta) T(w, k, \eta) d\eta, \quad S(n, \eta) = \left\{ 2(1-n) + \eta^2 \left[1 - \frac{K_0^2(\eta)}{K_1^2(\eta)} \right] \right\}^{-1}, \quad (5)$$

$$T(k, w, \eta) = \frac{\sin\left(\frac{w}{2}\eta\right) \cos(kw\eta)}{\eta}.$$

Тобто, підінтегральний вираз у першій з формул (5) складається з двох множників — ядра $S(n, \eta)$, яке залежить тільки від одного параметру ν , та функції $T(w, k, \eta)$, до складу якої входять два інших параметри — відносна глибина w і номер довільної заходки k , посередині якої визначається переміщення поверхні виробки.

Як показує аналіз обох основних розрахункових формул (1) та (4) (і це підтверджується також вже згаданими графіками на рис. 2), переміщення поверхні вздовж нескінченної циліндричної виробки концентруються на ділянці навантаження, а по мірі віддалення від неї поступово вчухають і на певній відстані стають з практичної точки зору несуттєвими. Характер зазначеного вчухання залежить від відносної глибини заходки w , відносної відстані між серединами нульової та довільної заходки r або k та від коефіцієнту Пуассона породи ν . Табл. 1 ілюструє згадану залежність відносних переміщень $U_k(p)/U^0(p)$ поверхні тунельної виробки від перелічених вище факторів при $\nu = 0,25$.

Для переважної більшості гірських порід реальні значення коефіцієнту Пуассона знаходяться в діапазоні від 0,2 до 0,4, який є дещо більш вузьким, ніж можливий теоретичний (0...0,5). Як свідчать дані зазначеної таблиці, меншим значення згаданого коефіцієнту відповідають більші за довжиною ділянки розповсюдження вздовж виробки впливу місцевого поясного навантаження на її поверхню і, навпаки, при більших значеннях коефіцієнту Пуассон на такі ділянки скорочуються. Дані, вміщені у згаданій вище таблиці можуть послугувати за орієнтир для визначення довжини ділянки, яку слід вводити у розрахунок при виконанні практичної оцінки деформацій виробки. Відсутні числові значення відносних переміщень, у правому нижньому куті таблиці 1, за своєю величиною не перевищують 5% від відповідних максимальних значень переміщень посередині завантаженої заходки. Зрозуміло, що у більшості практичних розрахунків цими значеннями можна знехтувати.

Слід відзначити, що всі розглянуті тут розрахункові положення поки що стосуються виробок нескінченної довжини. У дійсності виробка поділяється вибоєм на дві окремі частини — передвибійну ділянку та ділянку оголення. На рис. 3 наведена схема розташування, прийнятих позначень і нумерації заходок у зоні вибою протяжної тунельної виробки під час її проходки. Розкритій привибійній ділянці, з поверхні якої знімаються (прикладаються зі зворотним знаком) напруження p_0 , що діяли там до розробки породи, надано номер 0. Нумерація вже раніш розкритих заходок на ділянці оголення ($r = 1, 2, \dots, m_1$) і наступних заходок на передвибійній ділянці, які ще підлягають розкриттю ($k = 1, 2, \dots, m_0$), ведеться окремо в обох напрямках, починаючи від цієї нульової заходки. Зрозуміло, що попереду вибою на поверхні майбутньої тунельної виробки неодмінно повинно виникати явище концентрації напружень, яке в положеннях сучасної підземної геомеханіки набуло назви **додаткового опорного тиску**. Зазначений тиск розповсюджується на декілька майбутніх заходок на передвибійній ділянці, безпосередньо прилеглих до лобу вибою, а сама назва «додатковий» пов'язана з тим, що причиною появи згаданого тиску є розробка породи і зняття з поверхні саме нульової заходки напружень, які існували там до її розкриття. При цьому поки що не береться до уваги діючий **основний опорний тиск**, який є проявленням в непорушеному масиві порід дії природного гравітаційного або залишкового тектонічного силового поля. Зрозуміло, що окреслення епюри додаткового опорного тиску взагалі повинно бути криволінійним, але при наближеній

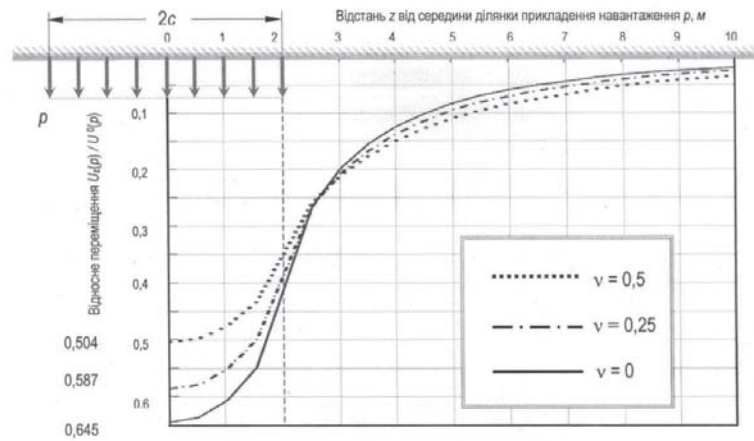


Рис. 2. Графіки залежності відносного переміщення поверхні виробки $U_k(p) / U^0(p)$ від відстані z до її довільного поперечного перерізу при різних значеннях коефіцієнту Пуассона породи ν

Таблиця 1
Значення відносного переміщення $U_k(p)/U^0(p)$ для заходок виробки при коефіцієнті Пуассона породи $\nu = 0,25$

Номер заходки k	Відносне переміщення $U_k(p) / U^0(p)$ для заходки k при коефіцієнті $\nu = 0,25$			
	Відносна глибина заходок w			
	0,2	0,4	0,6	0,8
0	0,267	0,409	0,510	0,587
1	0,122	0,143	0,144	0,136
2	0,069	0,063	0,050	0,040
3	0,044	0,033		
4	0,031			
5	0,022			
6	0,016			

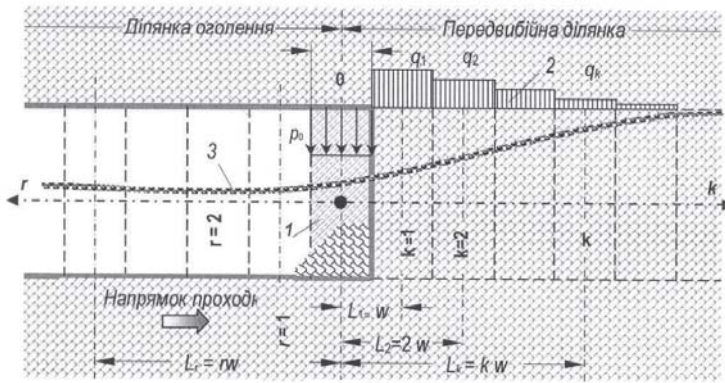


Рис. 3. Схема розташування та позначення заходок у зоні вибою протяжної підземної виробки:
 1 — розкрита заходка 0, 2 — еюра додаткового опорного тиску на передвибійній ділянці, 3 — еюра осадок (вертикальних переміщень) на рівні верху

напружень p_0 , які знімаються з поверхні заходки 0 під час її розробки, та переміщення $U_r^\infty(\sum q_k)$, якого набуває поверхня цієї саме віртуальної нескінченної виробки від сукупності напруж додаткового опорного тиску q_k , які виникають на заходках передвибійної ділянки (рис. 4 а, б). Перший доданок — переміщення $U_r(p_0)$ знаходиться напряму за формулами (4), (5) при $L_r = rw$. Таким чином, у межах ділянки оголення переміщення $U_r(p_0)$ поверхні нескінченної протяжної віртуальної виробки посередині заходки r від напружень p_0 , які знімаються з поверхні нульової заходки, визначається залежністю

$$U_r(p_0) = \frac{2(1-\nu)p_0R}{\rho G} \int_0^\infty S(\nu, z) T(w, rw, z) dz \quad (6)$$

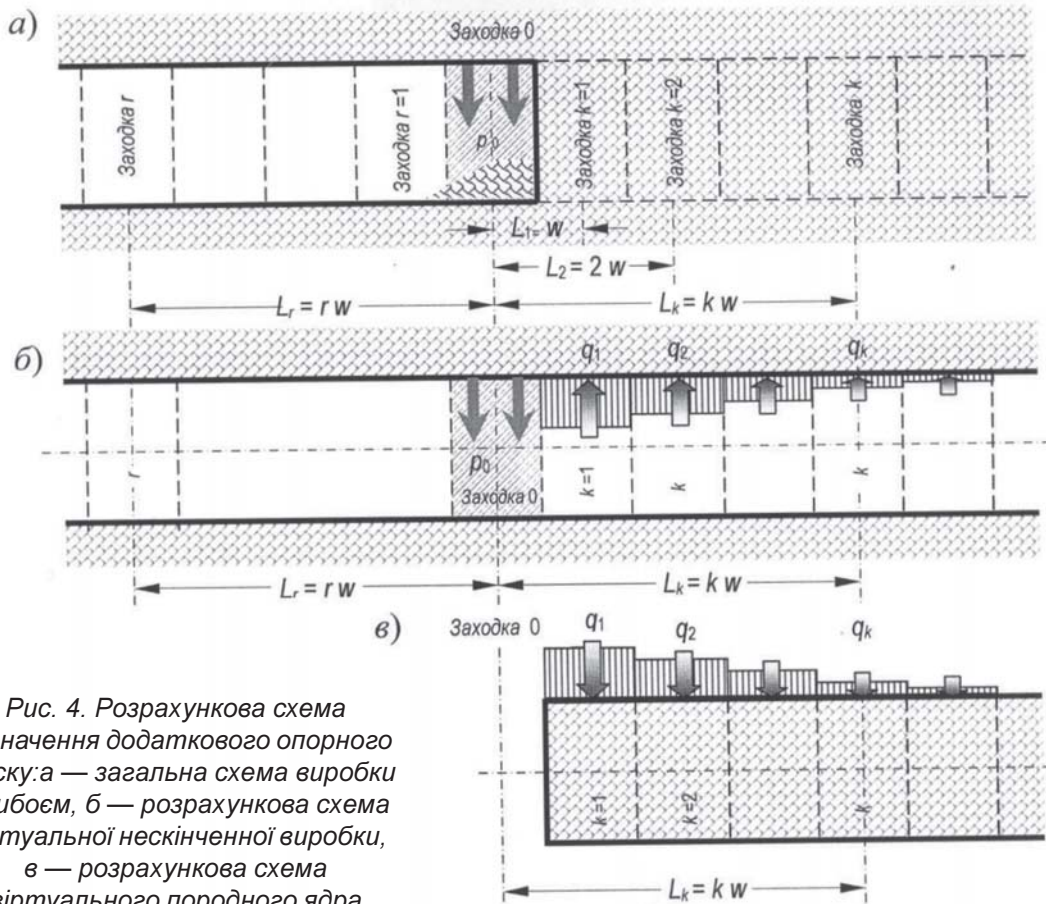


Рис. 4. Розрахункова схема визначення додаткового опорного тиску: а — загальна схема виробки з вибоєм, б — розрахункова схема віртуальної нескінченної виробки, в — розрахункова схема віртуального породного ядра

Що стосується другого доданку — переміщення поверхні виробки $U_r^\infty(\sum q_k)$ посередині заходки r на ділянці оголення від сукупності додаткового опорного тиску q_k , який діє на заходках передзайбійної ділянки, то для його визначення необхідно вирішити своєрідну локальну контактну задачу. Суть постановки цієї задачі полягає у тому, що виробка з вибоєм розглядається як повністю нескінченна, але на передзайбійній ділянці заповнена породним ядром (рис. 4, в). Але перед усе слід з'ясувати, чому дорівнює величина навантаження p_0 , що знімається з поверхні виробки у межах нульової заходки, яка розташована в зоні концентрації напружень у самому початку передзайбійної ділянки. Справа у тому, що у технологічній ситуації, якій відповідають розрахункові схеми, зображені на рисунках 3 та 4, передус утворення ділянки оголення, з яким саме пов'язується виникнення додаткового опорного тиску на передзайбійній ділянці, у тому числі, і у межах заходки 0. Накопичене переміщення поверхні віртуальної нескінченної виробки посередині її нульової заходки під впливом вже здійсненого послідовного розкриття всіх заходок ділянки оголення визначається формулою

$$U_0(p) = - U^0(p) \frac{4(1-\nu)}{\rho} \sum_{r=1}^{m_1} I(\nu, w, r), \quad (7)$$

де m_1 — загальна кількість вже розкритих заходок на ділянці оголення, а значення функції $I(\nu, w, r)$ знаходиться за останньою формулою (5) після заміни у ній k на r . Власне переміщення поверхні виробки посередині нульової заходки під впливом поки ще невідомого опорного тиску p_0 , діючого у межах цієї заходки при $r = 0$ визначається залежністю

$$U_0(p_0) = U^0(p_0) \frac{4(1-\nu)}{\rho} I(\nu, w, r = 0), \quad (8)$$

де $I(\nu, w, r = 0) = \int_0^\infty S(\nu, z) T(w, r = 0, z) dz, \quad (9) \quad T(w, r = 0, z) = \frac{\sin(\frac{w}{2} z)}{z} \quad (10)$

Для знаходження переміщення поверхні циліндричного породного заповнення нескінченної виробки на ділянці нульової заходки, знаходиться з використанням відомої гіпотези місцевих деформацій. При цьому умовно вважається, що породне заповнення (ядро) на цій ділянці працює як сукупність відокремлених один від одного дисків в умовах плоского напруженого стану. Згідно Ламе переміщення поверхні такого диску визначається формулою

$$U'_0(p_0) = - \frac{p_0 R(1-\nu)}{E} = - \frac{p_0 R(1-\nu)}{2G(1+\nu)}. \quad (11)$$

Рівняння сумісності переміщень поверхні нескінченної виробки та умовного породного ядра в поперечному перерізі посередині нульової заходки

$$U_0(p) + U_0(p_0) = U'_0(p_0) \quad (12)$$

після підстановки у нього відповідних переміщень за формулами (6)-(11) набуває розгорнутого вигляду

$$- \frac{pR}{2G} \frac{4(1-\nu)}{\rho} \sum_{r=1}^{m_1} I(\nu, w, r) + \frac{p_0 R}{2G} \frac{4(1-\nu)}{\rho} I(\nu, w, r = 0) = - \frac{p_0 R(1-\nu)}{2G(1+\nu)}, \quad (13)$$

або після деяких тотожних алгебраїчних перетворень

$$- \sum_{r=1}^{m_1} I(\nu, w, r) + \nu_p I(\nu, w, r = 0) = - \frac{\nu_p \rho}{4(1+\nu)}, \quad (14)$$

$$\chi_p = \frac{p_0}{p} = \frac{\sum_{r=1}^{m_1} I(\mathbf{h}, w, r)}{4(1+\mathbf{h}) + I(\mathbf{h}, w, r=0)} = \frac{\sum_{r=1}^{m_1} \int_0^{\infty} \mathcal{S}(z) T(rz) dz}{4(1+\mathbf{h}) + \int_0^{\infty} \mathcal{S}(z) T(z) dz} \quad (15)$$

Характерним при цьому є те, що завдяки застосуванню відносних геометричних параметрів величина коефіцієнту χ_p не залежить від радіусу R , а тобто, і від розмірів поперечного перерізу тунельної виробки. Разом з тим, як свідчать графіки на вже згаданому рис. 2, а також деякі проміжні числові результати, одержані під час розрахунку цих графіків, є наявною суттєва залежність коефіцієнту χ_p від відносної довжини ділянки оголення і величини коефіцієнту \mathbf{h} . При цьому, найбільша концентрація додаткового опорного тиску має місце при значній довжині ділянки оголення. Найменші значення χ_p відповідають мінімальному значенню коефіцієнта Пуассона $\nu = 0$, а при збільшенні \mathbf{h} до можливого теоретичного максимуму цього коефіцієнту $\nu = 0,5$ величина χ_p значно зростає.

Після знаходження коефіцієнту χ_p виникає зручна можливість далі не звертатися до передісторії виникнення технологічної ситуації, покладеної в основу схем на рисунках 3 та 4, і при визначенні додаткового опорного тиску на передвибійній ділянці виходити лише з умов розробки породи у межах нульової заходки та зняття з її поверхні існуючих там напружень $\chi_p p$. Для визначення значень додаткового опорного тиску q_k на кожній заходці k передвибійної ділянки необхідно розглянути другу локальну контактну задачу і задовольнити на згаданій ділянці умову загальності переміщень на поверхні майбутньої виробки і умовного породного заповнення, які виникають посередині кожної з заходок під впливом зняття з поверхні нульової заходки напружень $\chi_p p$. При постановці і вирішенні згаданої контактної задачі реалізується відомий екстремальний принцип Лагранжа [3] та впливаючий з нього метод сил будівельної механіки. Зайвими невідомими цієї задачі є значення додаткового опорного тиску q_k у межах кожної з майбутніх заходок на передвибійній ділянці. Умови рівності сумарних переміщень у напрямку кожного зайвого невідомого j від саме цього невідомого, всіх інших зайвих невідомих $k \neq j$ та зовнішнього навантаження $\chi_p p$ на нульовій заходці записуються у вигляді системи канонічних лінійних рівнянь методу сил порядку m_0 , яка саме визначає зайві невідомі напруження q_k :

$$\sum_{k=1}^{m_0} q_k \Delta_{jk} + \Delta_{jp} = 0 \quad (j=1, 2, \dots, m_0), \quad (17)$$

У наведеній вище системі рівнянь (17): $\delta_k = \Delta'_{kk} + \Delta''_{kk}$ — головні одиничні переміщення, кожне з яких має дві складові: Δ'_{kk} — умовне переміщення поверхні k -ої заходки від одиничного напруження $\tilde{q}_k = 1$, яке прикладено у межах цієї саме заходки, та Δ''_{kk} — переміщення поверхні умовного внутрішнього породного заповнення виробки k -ої заходки від напруження $\tilde{q}_k = 1$, що діє у межах цієї саме заходки. Залежності для цих переміщень мають вигляд:

$$\delta_{jj} = \delta_{kk} = \frac{p}{4(1+\mathbf{h})} + \int_0^{\infty} \mathcal{S}(\mathbf{h}, z) \frac{\sin(\frac{w}{2}z)}{3} d\eta \quad (j=k), \quad (18)$$

$$\delta_{jk} = \delta_{kj} = \int_0^{\infty} \mathcal{S}(\nu, z) \frac{\sin(\frac{w}{2}z)}{3} \cos[(j-k)w\eta] d\eta \quad (j \neq k), \quad (19)$$

а вантажні переміщення визначаються формулою

$$\Delta_{jp} = -\chi_p p \int_0^{\infty} \mathcal{S}(\mathbf{h}, z) \frac{\sin(\frac{w}{2}z)}{3} \cos(jw\eta) d\eta. \quad (20)$$

В результаті чисельного розв'язання системи канонічних рівнянь (17) з коефіцієнтами-переміщеннями за формулами (18) — (20) визначаються значення додаткового опорного тиску q_k на заходках передвибійної ділянки.

Переміщення поверхні виробки U_r у будь-якому довільному поперечному перерізі r у межах ділянки оголення визначається як суперпозиція переміщення U_r^0 у тому самому перерізі r , яке викликано розробкою нульової заходки і зняттям з її поверхонь напружень p_0 , та переміщення у перерізі r від сумарної дії напружень додаткового опорного тиску q_k , який виникає у межах кожної заходки k на передвибійній ділянці під впливом зняття згаданого напруження p_0 з нульової заходки

$$U_r = \frac{2(1-\nu)R}{\rho G} \left[\tilde{U}_r^0 + \sum_{k=1}^{m_0} \tilde{U}_{rq}^{(k)} \right], \quad (21)$$

де

$$\tilde{U}_r^0 = -p\chi_p I(\mathbf{n}, w, r), \quad \sum_{k=1}^{m_0} \tilde{U}_{rq}^{(k)} = \sum_{k=1}^{m_0} q_k I(\mathbf{n}, w, r+k). \quad (22)$$

Одержані вище залежності, які надають можливість оцінювати вплив вибою на деформований стан виробки, можна розглядати як певний крок на шляху побудови 3D-моделі для розрахунку тунельних опор.

Література

1. Tranter C.J. On the Elastic of a Cylindrical Hole by a Localised Hidro static Pressure. — Quarterly of Applied Mathematica, 1946, vol.4, No 3, p. 298-302.

3. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1968. — 344 с.

2. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. — 744 с.

УДК 624.1

ЗАСТОСУВАННЯ УНІФІКОВАНОЇ БАГАТОШАРНІРНОЇ ОПРАВИ ДЛЯ СТАНЦІЙ МЕТРОПОЛІТЕНУ ТА МІСЬКИХ ПІДЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

Доктор технічних наук Айвазов Ю.М.,
Кот Д.В.

В статті розглядається застосування універсальної багатошарнірної односклепистої оправи для споруд станційного комплексу метрополітену, міських транзитних транспортних тунелів, підземних автостоянок та гаражів.

This article describe using of convertible multihinge single arched vaulted lining for the metro station structures, for city transit tunnels, underground car parks and garages.

Ідея використання цілком збірної односклепистої конструкції оправи для станцій метрополітенів виникла 40 років тому, але слід констатувати, що вона досі не знайшла повноцінного втілення у практику підземного транспортного будівництва.

В [1] була запропонована цілком збірна конструкція оправи універсальної підземної споруди, яка призначається для односклепистих станцій з шириною пасажирської острівної платформи 12 м, що дозволяє здійснити примикання до її торця чотирьох стрічок ескалатору (рис.1). До складу верхнього склепіння цієї оправи, окресленого за внутрішнім радіусом 11,153 м, входить 10 нормальних гладких залізобетонних блоків ВН з центрованими стиками без в'язів розтягу та розпірний блок ВК, обладнаний двома порожнинами, в яких розташовуються плоскі домкрати типу Фрейсене. Згадане верхнє склепіння спи-