

Кот Д.В.

## ЕТАПИ СПОРУДЖЕННЯ ТА ОСНОВНІ РОЗРАХУНКОВІ СТАДІЇ ОДНОСКЛЕПИСТОЇ ПІДЗЕМНОЇ СПОРУДИ ДЛЯ МІСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

**Анотація.** Ця стаття описує етапи спорудження та основні розрахункові стадії та схеми односклепистої підземної споруди для міського транспорту.

**Ключові слова:** будівництво, тунель, оправа.

**Аннотация.** Эта статья описывает все этапы строительства односводчатого сооружения глубокого заложения и его все расчетные стадии и схемы.

**Ключевые слова:** строительство, тоннель, обделка.

**Annotation.** This article describes stages of construction and main design stage of single arched vaulted deep location construction for transport.

**Key words:** building, tunnel, lining.

Оправа універсальної підземної споруди [1] розраховується на інтегральне вертикальне навантаження від ваги всієї налягаючої товщі порід  $2P_0$ , під яким розуміється рівнодіюча згаданої ваги, яка збирається з прольоту оправи  $2B_r$ .

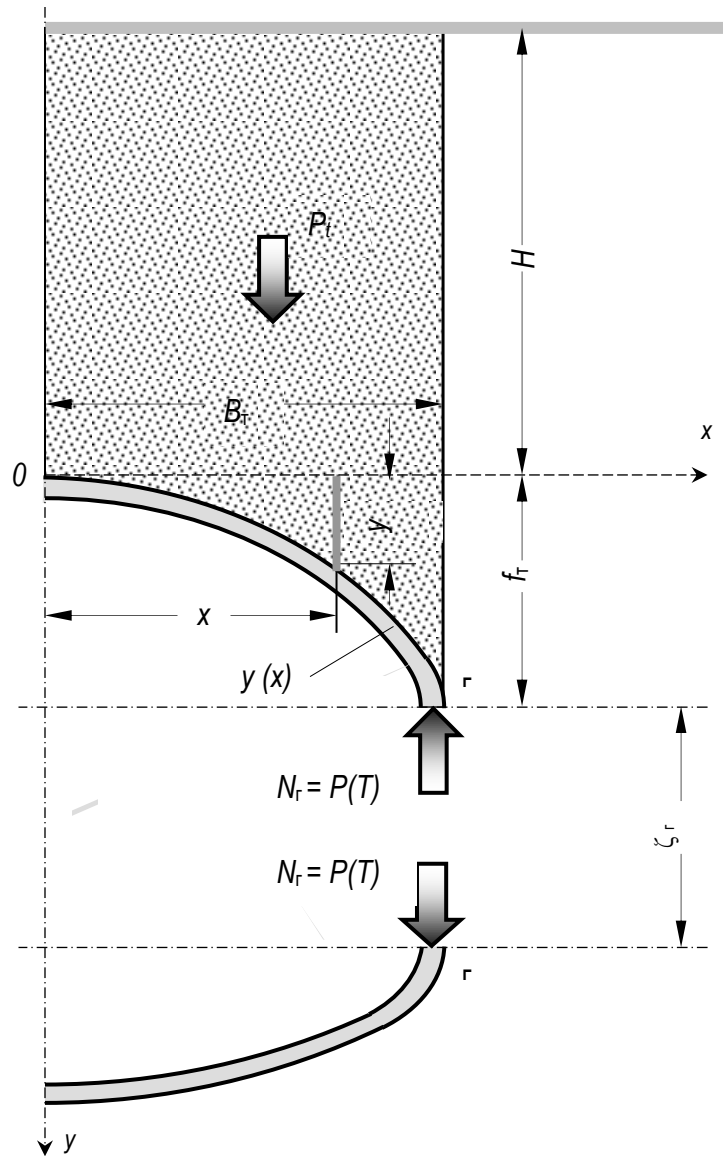
Для оправи з коробовим зовнішнім окресленням (рис. 1) незалежно від її конструктивних особливостей величина  $P_0$  знаходиться за формулою:

$$P(T) = n_1 P_0 \Omega(T), \quad (1)$$

де

$$P_0 = b\gamma \left( HB_r + \int_0^{B_r} \gamma(x) dx \right), \quad (2)$$

$n_1 = 1,1$  – коефіцієнт надійності за навантаженням згідно з [3],  $b$  – розрахункова довжина ділянки споруди у поздовжньому напрямку,  $\gamma$  – усереднена питома вага породи налягаючої товщі,  $H$  – глибина розташування верху споруди,  $B_r$  – половина умовного зовнішнього діаметру оправи,  $y(x)$  – рівняння зовнішнього окреслення верхньої частини оправи.



**Рисунок 1** – Схема визначення інтегрального навантаження від налягаючої товщі порід

Функція впливу часу на розвиток навантаження на оправу  $\Omega(T)$  визначається на підставі положень теорії пружної спадковості через часовий

інтегральний  $\mathcal{E}_\alpha^*$  – оператор з ядром у вигляді дрібноекспоненціальної функції від’ємного порядку (ядро Работнова) [6], який має вигляд:

$$\mathcal{E}_\alpha^*(-\beta; T) = \int_0^T \mathcal{E}_\alpha^*(-\beta; T - \tau), \quad (3)$$

де  $\alpha \approx 0,7$  – реологічна константа,  $\beta = \tau_0^{\alpha-1}$  – реологічна константа,  $\tau_0$  – час релаксації (добы) при випробуванні породи на стиск. Константа  $\beta$  залежить від ступеню реологічності породи і для спондилітових глин (а також порід, що прилягають до цих глин) знаходиться у межах 0,55...0,68. Для практичних розрахунків підземних споруд Києва в спондилітових глинах може використовуватися  $\beta = 0,59$ .

Вказана функція впливу часу на розвиток навантаження на оправу  $\Omega_t$  виражається через часовий інтегральний оператор пружної спадковості (3) формулою:

$$\Omega(t) = \beta \int_0^T \mathcal{E}_\alpha^*(-\beta; T - \tau). \quad (4)$$

З використанням алгебраїчної апроксимації [7] згаданого ядра інтегральному часовому оператору пружної спадковості надається вигляд

$$\mathcal{E}_\alpha^*(-\beta; T) = 1/\beta \{1 - \exp[(1 - \alpha)^{1-\alpha} \beta T^{1-\alpha}]\}, \quad (5)$$

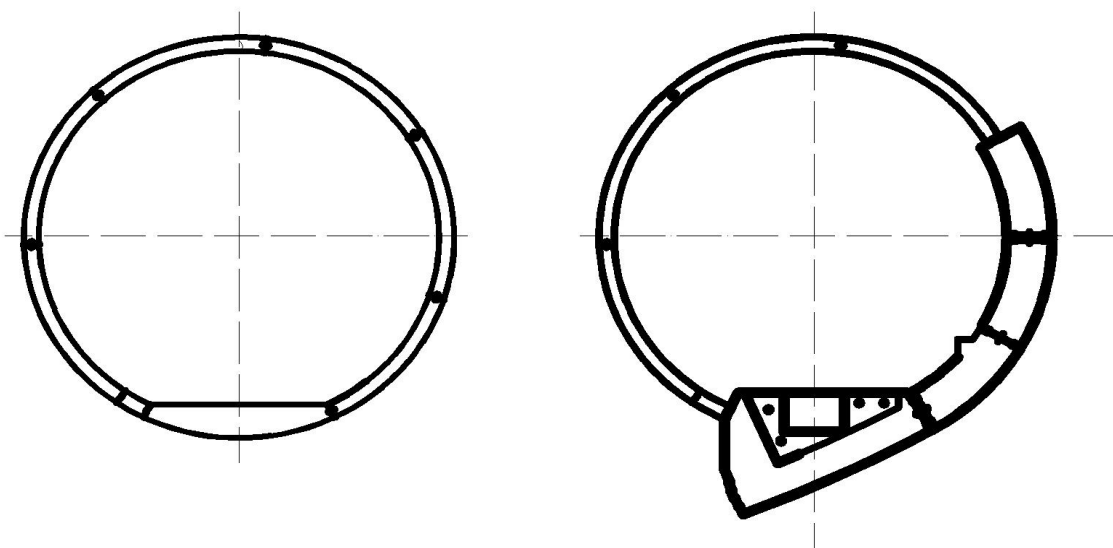
а для визначення функції впливу часу  $\Omega(T)$  при  $\alpha = -0,7$  та при  $\beta = 0,59$  використовується формула

$$\Omega(T) = 1 - \exp(0,785 T^{0,3}). \quad (6)$$

Прикладання навантаження до оправи виконується по її розрахунковим стадіям, які відповідають окремим технологічним етапам будівництва і

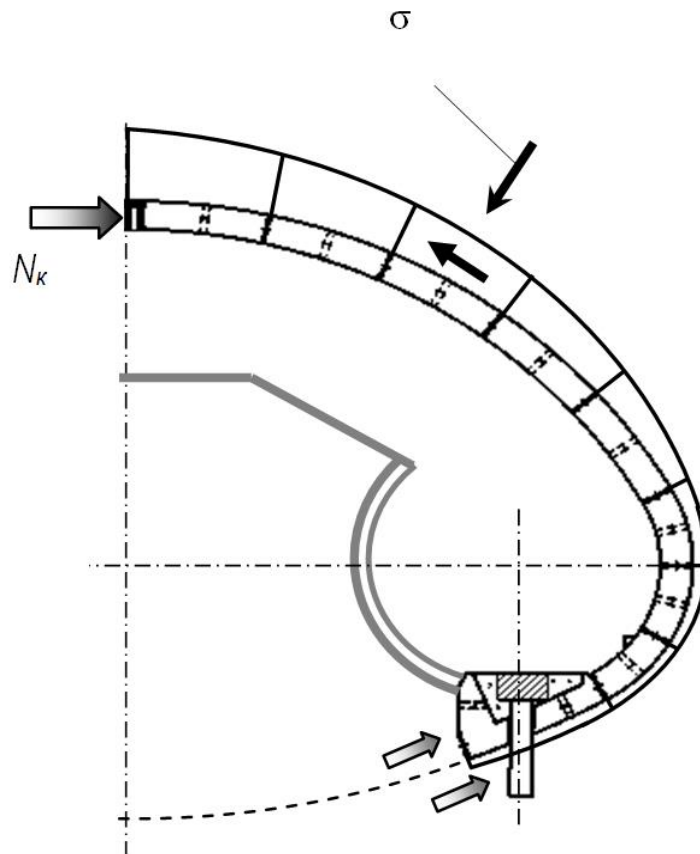
експлуатації підземної споруди та часовим рамкам виконання цих етапів. Стосовно багат шарнірних оправ односклепистих підземних споруд можна визначити такі стадії спорудження та розрахунку [9].

**Стадія 0.** Стадія 0 (рис. 2) не розрахункова. На цій стадії споруджуються два пілоттунелі. Існує два варіанти спорудження цих тунелів. Перший – спорудження ведеться за допомогою звичайної обтисненої в породу оправ, яка потім перебирається, інший – ведеться додатково доробка породи під монтаж 3-х стінових та опорного блоків, які стануть вже постійною оправою станційної споруди. Також на цьому етапі спорудження ведеться влаштування буронабивних паль та поздовжньої монолітної балки в опорних блоках.



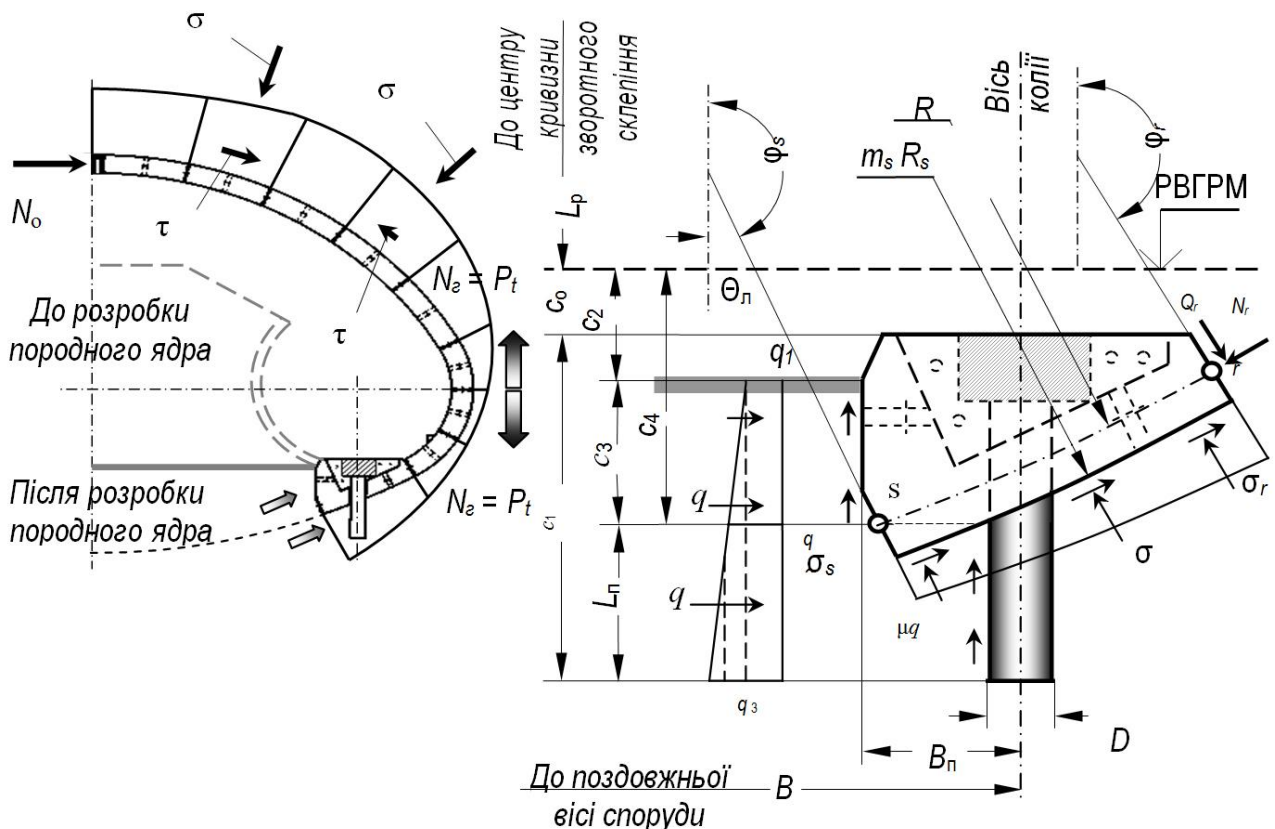
**Рисунок 2** – Два варіанти пілоттунелю

**Стадія 1.** Стадія попереднього обтиснення верхнього склепіння (рис. 3). У цій стадії здійснюється обтиснення змонтованого верхнього склепіння у його шелізі контрольованим зусиллям попереднього обтиснення  $N_k$ , яке за допомогою розпірного устрою прикладається у вигляді поздовжньої сили. На момент обтиснення ( $T = 0$ ) в змонтованій частині оправ, яка складається з верхнього склепіння, бокових стін та опорних лоткових блоків, діють зусилля від згаданого обтиснення, а також досить незначні зусилля від її власної ваги. Практика показала, що доцільна величина контрольованого зусилля обтиснення кільця верхнього склепіння оправ  $N_k$  складає біля половини значення  $P_0$ .



**Рисунок 3** – Стадія попереднього обтиснення верхнього склепіння

**Стадія 2.** Стадія завершення розробки породного ядра (рис. 4). Початком цієї стадії слід вважати час  $T = 0$ . Незамкнута оправа споруди складається з тих саме елементів, що і в попередній стадії. Тривалість стадії 2 визначається часом  $T_2$ , необхідним для розробки породного ядра на всій довжині споруди або на її значній частині (в залежності від прийнятої технології), а інтегральне навантаження на кінець стадії при  $T = T_2$  знаходиться через функцію впливу часу  $\Omega(T_2)$ . Зрозуміло, що при необхідності інтегральне навантаження на оправу у цій стадії може бути визначено для будь-якого довільного часу в інтервалі від 0 до  $t_2$ . Тут слід зауважити, що наявність породного ядра, яке своєю вагою обтискує породу у лотковій частині споруди, покращує умови роботи опорного лоткового блоку і всієї змонтованої частини оправи, а тому за кінцевий час згаданої стадії вважається саме час завершення робіт з розробки згаданого породного ядра, коли вказаного позитивного обтиснення породи лоткової частини вже не відбувається.

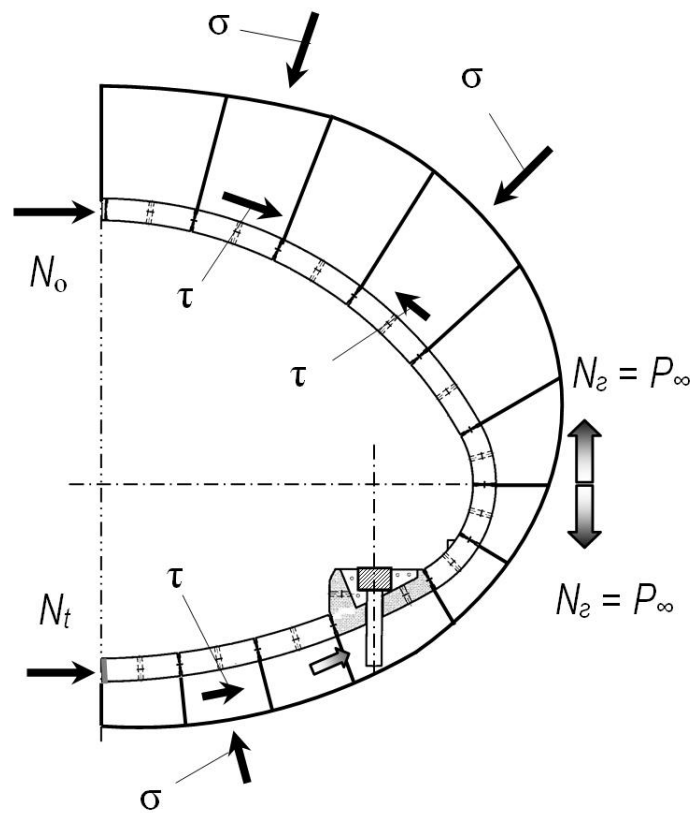


**Рисунок 4** – Стадія завершення розробки породного ядра (стадія 2)

**Стадія 3.** Ця стадія потребує особливої уваги – стадія розробки лоткової частини породи, коли унеможливується спирання на породу внутрішніх граней опорних лоткових блоків (рис. 5). На відміну від породного ядра розробка породи у лотковій частині споруди виконується окремими невеликими заходками на одне або два кільця оправи (0,75...1,5 м) з невідкладним монтажем блоків зворотного склепіння та замиканням оправи. При цьому на таких окремих заходках, де розроблена порода лотка, але ще не змонтоване зворотне склепіння, утворюються т.зв. “вісячі” кільця оправи. Стійкість зазначених кілець забезпечується за рахунок сил тертя по зовнішньому контуру наявних блоків оправи, анкерних буронабивних паль, вбудованих в опорні лоткові блоки, і поздовжніх в’язей – монолітних залізобетонних балок, влаштованих в згадані блоки, та болтів, які встановлюються в їхніх кільцевих бортах (рис. 5). При визначенні зусиль у таких кільцях в розрахунок вводиться інтегральне навантаження  $P_3$ , яке відповідає функції впливу часу  $\Omega(T_3)$ , де  $T_3$  – час розробки породи в лотковій



застосовується тільки для найскорішого включення в роботу зворотного склепіння і може призначатися від 0,15 до 0,25 величини  $P_0$ .



**Рисунок 6** – Стадія роботи замкнутої конструкції (стадія 4)

При розрахунку на інтегральне навантаження оправи односклепистої багат шарнірної універсальної споруди у всіх стадіях конструкція розглядається як система брусів (у загальному випадку кривих) на пружній породній основі. Через значну згинальну жорсткість відносно коротких блоків оправи, остання працює як багат шарнірний ланцюг, і всі переміщення носять кінематичний характер та здійснюються в основному за рахунок взаємного повороту у стиках та переміщень окремих блоків, які можуть вважатися жорсткими дисками.

До складу верхнього півсклепіння входить  $n$  блоків, кожна бокова стіна оправи складається з  $r - n + 1$  блоків, опорний лотковий блок має номер  $r + 1$  (або  $s$ ), зворотне півсклепіння складається з  $t - s$  лоткових блоків. Шарніри (стики блоків) нумеруються у напрямку від шелиги склепіння до лотка. Кожен блок має номер свого правого (старшого) шарніру. Без суттєвої втрати точності



короткі розпирні блоки  $BK$  у верхньому та зворотному склепіннях оправи замінені шарнірами (відповідно 0 та  $t$ ). Таким чином, блоки верхнього півсклепіння мають номери 1, 2 ...  $n$ , блоки бокової стіни –  $n+1, n+2, \dots, r$ , блоки зворотного півсклепіння –  $s+1, s+2, \dots, t$ .

У межах довільного жорсткого  $i$ -го блоку оправи (з початковим шарніром  $i-1$ , а з кінцевим –  $i$ ), зовнішня поверхня якого окреслена за дугою кола нормальна складова контактних напружень  $\sigma_\psi$  розподіляється за законом [8]:

$$\sigma_\psi = (1/\sin \psi_i) * [\sigma_i \sin \psi + \sigma_{i-1} \sin (\psi_i - \psi)], \quad (7)$$

де  $\psi_i$  – центральний кут охоплення  $i$ -го блоку,  $\sigma_i$  – значення нормальної складової контактних напружень на рівні  $i$ -го шарніру,  $\sigma_{i-1}$  – значення нормальної складової контактних напружень на рівні шарніру  $i - 1$ ,  $\psi$  – поточна кутова координата у межах  $i$ -го блоку, яка відраховується від шарніру  $i-1$ . Дотична складова контактних напружень  $\tau$  пов'язана з виникненням сил тертя і виражається через значення нормальної складовою  $\sigma$  за допомогою співвідношення:

$$\tau = \pm \mu \sigma, \quad (8)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя між породним контуром виробки та зовнішньою поверхнею оправи. Знак перед  $\mu$  у правій частині (8) залежить від напрямку взаємного дотичного зміщення оправи і породи по контактному контуру. Вважається, що поверхня виробки є пружною основою з властивостями, описаними гіпотезою місцевих деформацій (гіпотезою Фусса-Вінклера), а тому нормальні складові переміщень та контактних напружень пов'язуються:

$$W = \frac{\sigma}{k_0}, \quad (9)$$

де  $k_0$  – коефіцієнт пружного стиску породної основи.

Значення внутрішніх зусиль у довільному поперечному перерізі  $i$ -го блоку з кутовою координатою  $\psi$  при розподілі нормальних контактних напружень за (7) визначаються формулами [8]:

$$Q_\psi = N_{i-1} \sin \psi + Q_{i-1} \cos \psi - m_i R_i \sigma_{i-1} (e_\psi - \{\cos \psi / \sin \psi\} d_\psi) - \{m_i R_i / \sin \psi\} \sigma_i d_\psi,$$

$$N_\psi = N_{i-1} \cos \psi - Q_{i-1} \sin \psi + m_i R_i \sigma_{i-1} (a_\psi + \{\cos \psi / \sin \psi\} \psi b_\psi) - \{m_i R_i / \sin \psi\} b_\psi,$$
(10)

$$M_\psi = N_{i-1} R_i (1 - \cos \psi) + Q_{i-1} R_i \sin \psi - m_i R_i^2 \sigma_{i-1} [a_\psi + m_i e_\psi + \{\cos \psi / \sin \psi\} (b_\psi - m_i f_\psi)] + \{m_i R_i / \sin \psi\} \sigma_i (b_\psi - m_i f_\psi).$$

В формулах (10):

$N_{i-1}$  та  $Q_{i-1}$  – значення відповідно поздовжньої та поперечної сили у початковому шарнірі  $i-1$  блоку  $i$ ,  $\sigma_{i-1}$  та  $\sigma_i$  – значення нормальних контактних напружень відповідно у точках  $i-1$  та  $i$ ,  $\psi_i$  – центральний кут охоплення  $i$ -го блоку,  $R_i$  – осьовий радіус кривизни  $i$ -го блоку,  $m_i$  – відношення зовнішнього радіусу кривизни  $i$ -го блоку до осьового,

$$a_\psi = \frac{1}{2} [\psi(\sin \psi - \mu \cos \psi - \mu \sin \psi)], \quad b_\psi = \frac{1}{2} [\psi(\cos \psi + \mu \sin \psi) - \sin \psi],$$

$$c_\psi = \frac{1}{2} [\psi(\cos \psi + \mu \sin \psi) + \sin \psi], \quad d_\psi = \frac{1}{2} [\psi(\sin \psi - \mu \cos \psi) + \mu \sin \psi],$$
(11)

$$e_\psi = \mu \sin \psi, \quad f_\psi = \mu (1 - \cos \psi).$$

В (11) додатне значення коефіцієнту тертя зовнішньої поверхні блоку по поверхні виробки  $\mu$  відповідає спрямуванню дотичних контактних напружень  $\tau$  від лотка оправи до шелиги її верхнього склепіння. У протилежному випадку значення коефіцієнту  $\mu$  у всі залежності (10) повинно входити зі знаком “мінус”.

На заключних етапах розрахунків оправи універсальної підземної споруди станційного комплексу метрополітену на підставі положень [4] виконується перевірка несучої спроможності її елементів.

## Література

1. Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво» Вип. 81, Київ, НТУ, 2011.
2. ГОСТ 23961–80. Метрополитены. Габариты приближения строений, оборудования и подвижного состава.– М.: Издательство стандартов, 1980.
3. ДБН В.2.3-7-2003. Державні будівельні норми України. Споруди транспорту. Метрополітени/Держбуд України. – К.: Держбуд України, 2003.
4. Глава СНиП 2.03.01–84. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
5. Рекомендации по проектированию и строительству односводчатых станций в плотных устойчивых глинах типа протерозойских. ЦНИИС, М.: 1979.
6. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979.
7. Глушко В.Т., Долинина Н.Н., Розовский М.И. Устойчивость горных выработок. – К.: Наукова думка, 1973.
8. Айвазов Ю.М. Розрахунок тунельної оправи за умовами рівноваги її елементів. Зб. «Автомоб. Дороги і дор. Будівництво». Вип. VI. К.: Будівельник, 1970.
9. Айвазов Ю.М. Расчет тоннельных обделок, обжатых в породе. – К.: КАДИ, 1978.
10. Методические рекомендации по статическому расчету односводчатых станций глубокого заложения. ЦНИИС, М.: 1979.