

2. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Основная задача теории фильтрации газа в угольных пластах. – ФТПРПИ, 1999, №5. – с. 13-18.
3. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф. Об измерении давления газа в угольных пластах. – ФТПРПИ, 1988, №3. – с. 3-23.
4. Кареев В.И., Коваленко Ю.Ф. Теоретическая модель фильтрации газа в газосодержащих угольных пластах. – ФТПРПИ, 1988, №6. – с. 47-55.
5. Кулинич В.С., Кулинич С.В. Влияние напряженно-деформированного состояния на газоотдачу метаносных горных пород. – В сб.: Геотехническая механика, №17. – Киев-Днепропетровск, 2000. – с. 152-156.
6. Ставрогин А.Н., Протосеня. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М. Недра, 1985. – 272 с.
7. Кулинич В.С., Перепелица В.Г., Курносоев С.А., Иванчишин С.Я. и др. Газовая проницаемость горных пород в разнокомпонентном поле сжимающих напряжений. – В сб.: Геотехническая механика, № 42. – Днепропетровск, 2003. – с. 18-24.
8. Круковский А.П., Круковская В.В. Фильтрация газа в зоне влияния очистной выработки с учетом напряженно-деформированного состояния углепородного массива. – В сб.: Геотехническая механика, № 49. – Днепропетровск, 2004. – с. 23-29.

УДК 622.28.044:622.831

Канд. техн. наук Г.І. Ларіонов
(ИГТМ НАН Украины)

ПРО ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ГІРСЬКИХ ПОРІД У ЗАМКОВІЙ ЧАСТИНІ НАВАНТАЖЕНОГО ПО ОСІ АНКЕРА

В работе рассмотрено решение пространственной задачи теории упругости по определению деформированного состояния в окрестности части шпура с закрепленным в нем металлополимерным анкером. Характер нагрузки, который принят в задаче, отвечает условию работы предварительно нагруженного металлополимерного анкера. Полученные графики демонстрируют распределение перемещений в окрестности шпура для линейного закона распределения касательных напряжений.

ON STRAIN ROCK STATE CAUSED WITH AXIS BOLT LOADING

The paper presents the space elastostatic strain state task solving for near borehole part with resin-metal bolt caused with axes tensile loading. The proposed load features are adequate to pre-tensioning resin-metal bolt work. Obtained strain state task results are presented in graphic views for linear shear stress distribution.

Вступ. Практичний досвід, накопичений в Україні [1,6] за останні роки й у світі [2-4], підтвердив, що сучасне анкерне кріплення дозволяє суттєво зменшити або усунути негативні наслідки, пов'язані з невпинним збільшенням глибини розробки родовищ корисних копалин. Однак свої основні технологічні властивості сучасний металлополімерний анкер може проявити тільки при дотриманні достатньо жорстких вимог щодо технології його встановлення. **Актуальність проблеми** визначення величини попереднього натягу анкера витікає з аналізу стану справ і підтверджується відсутністю сталого погляду на цю проблему [2-4]. Думки на доцільність виконання цієї операції і на визначення їх величин розбігаються [2-4]. Таким чином, проблема визначення величини попереднього навантаження анкера та її впливу на напружено-деформований стан встановленого анкера є актуальною і підлягає ретельному дослідженню.

Попередній натяг анкера має за мету ущільнення порід поблизу контуру ви-

робки, притиснення до поверхні виробки арматурних сіток та підхватів, створення умов негайного включення анкера до роботи. Крім того, попередній натяг сприяє поверненню напружено-деформованого стану гірських порід у породному масиві до стану існуючого до моменту його фіксації. Наявність зони сти скаючих напружень дозволяє залучати до роботи не тільки сам анкер, а що важливо, створює умови для сприйняття навантаження самою гірською породою.

Режим осьового навантаження анкера може виникати за різних технологічних обставин. Так, наприклад, анкери часто використовуються для підвішування технологічного обладнання при веденні монтажних робіт та в системах транспортування гірничої маси та вантажів. Анкер, за цих обставин, також знаходиться під дією осьових сил, які обумовлюють появу пропорційних їм дотичних напружень на поверхні шпура.

Постановка задачі формулюється з використанням схеми закріплення окремого анкера і зображена на рис. 1а. У гірській породі (1) зроблено свердловину радіусом r_0 , на деякій частині якої анкер (2) кріпиться за допомогою спеціальної фіксуєючої суміші (3). Довжина ділянки, на якій фіксується анкер – $2l$. Для створення умов відсутності розшарування призабійних шарів породи та у зв'язку з вищенаведеним, анкер попередньо навантажують осьовим зусиллям P .

Дія зафіксованого анкера на стінки шпура, у загальному випадку, еквівалентна дії нормальних та дотичних напружень, викликаних реакцією масиву на встановлений анкер. Величини нормальних та дотичних напружень можуть бути різними і бути зумовлені як процесами довантаження при подальшому просуванні забою виробки, так і процесами втрати міцності порід поблизу анкера.

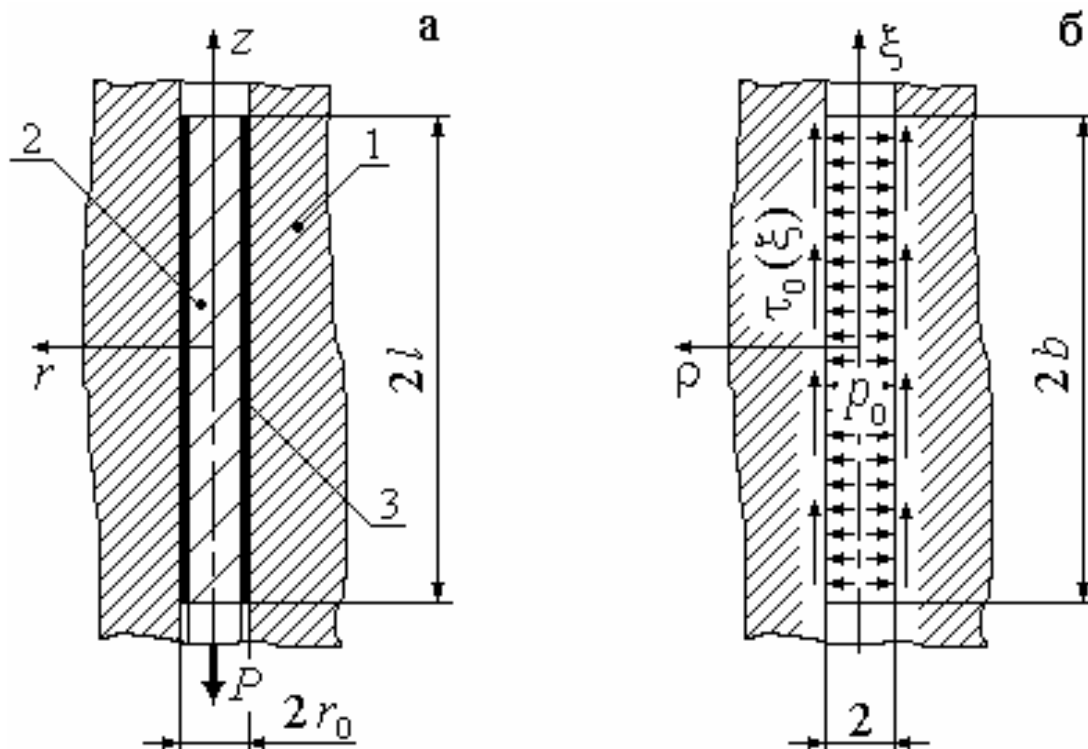


Рис. 1 – До постановки задачі про навантаження частини циліндричної свердловини встановленим анкером

Будемо вважати, що середовище є однорідним та ізотропним, а закріплення анкера здійснюється у глибині шпура на відстані, що значно перевищує його діаметр. Ці спрощення дають змогу розглядати модель середовища як пружний простір з достатньо довгим циліндричним отвором. З боку анкера на породу діє нормальне напруження, що є реакцією від дії на анкер гірського тиску, та дотичне напруження, яке може виникати як за рахунок різномодульності речовини фіксуєної суміші і гірських порід, так і за рахунок дії попереднього навантаження анкера. Величина нормального напруження p_0 (рис. 1б), що виникає на поверхні гірської породи шпура, знаходиться під впливом багатьох чинників, але у першому наближенні будемо вважати її величиною сталою, наприклад, пропорційною або рівною гірському тиску на певній глибині. Напруження розтягу $\sigma_z(\xi)$, як показують дослідження [5], суттєво змінюються по довжині анкера. Це дає підстави до висновків стосовно складного закону розподілення дотичних напружень по довжині зафіксованої частини анкера. У першому наближенні розподіл напружень будемо приймати лінійним.

Дотичне напруження на поверхні порожнини визначимо як лінійну функцію осьової координати:

$$\tau_0(\xi) = \frac{1}{2}[\tau_1(1 - \xi/b) + \tau_2(1 + \xi/b)],$$

де τ_1, τ_2 – дотичне напруження на початку та кінці ділянки, на якій зафіксовано анкер ($\tau_1 > \tau_2$). Узагальнюючи, припускаємо, що між ними виконується співвідношення $\tau_1 = k\tau_2$, де k – деяка константа. Зрозуміло, що осьове навантаження передається на стінки свердловини у вигляді дотичних напружень. Тому величини τ_1 і τ_2 повинні задовольняти третьому закону Ньютона:

$$\pi r_0 l (\tau_1 + \tau_2) = P.$$

Розв'язок задачі. Розподіл напружень в околі анкера описується основними рівняннями теорії пружності, які в осесиметричному випадку мають вигляд [6]:

$$\begin{aligned} \mu \left(\nabla^2 U - \frac{U}{r^2} \right) + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rU) + \frac{\partial W}{\partial z} \right] &= 0 ; \\ \mu \nabla^2 W + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rU) + \frac{\partial W}{\partial z} \right] &= 0 . \end{aligned} \quad (1)$$

де U, W – відповідно радіальна та осьова компоненти вектора переміщення; μ, λ – коефіцієнти Ламе; r, z – циліндричні координати;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \text{оператор Лапласа.}$$

Зробивши заміну змінних $\rho = r/r_0$, $\xi = z/r_0$, будемо шукати розв'язок рівнянь (1) у формі Папковича – Нейбера [6]:

$$\begin{aligned} U &= 4(1-\nu)B_r - \frac{\partial}{\partial \rho}(\rho B_r + \xi B_z + \frac{1}{r_0} B_0), \\ W &= 4(1-\nu)B_z - \frac{\partial}{\partial \xi}(\rho B_r + \xi B_z + \frac{1}{r_0} B_0), \end{aligned} \quad (2)$$

де B_0 – гармонічний скаляр, B_r, B_z – компоненти гармонічного вектора, які задовольняють рівнянням Лапласа:

$$\nabla^2 B_0 = 0, \quad \nabla^2 (B_r e^{i\varphi}) = 0, \quad \nabla^2 B_z = 0. \quad (3)$$

Крім того, гармонічні функції $B_0(\rho, \xi)$, $B_r(\rho, \xi)$, $B_z(\rho, \xi)$ повинні бути вибрані таким чином, щоб задовольняти граничним умовам:

$$\begin{aligned} \sigma_r \Big|_{\rho=1} &= \begin{cases} -p_0, & |\xi| \leq b; \\ 0, & |\xi| > b; \end{cases} \\ \tau_{rz} \Big|_{\rho=1} &= \begin{cases} -\tau_0(\xi), & |\xi| \leq b; \\ 0, & |\xi| > b, \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

де σ_r, τ_{rz} – радіальний та дотичний компоненти тензору напружень, $b = l/r_0$ – відносна довжина зафіксованої ділянки, p_0 – тиск на стінки шпура, викликаний процесами розшарування та зсуву на глибині H .

При знаходженні часткових розв'язків, без втрати загальності задачі, можна прийняти $B_z = 0$. Функції B_r та B_0 представимо у формі:

$$B_r = R(\rho)e^{i\beta\xi}, \quad B_0 = r_0 Q(\rho)e^{i\beta\xi}, \quad (5)$$

де β – власний параметр, i – уявна одиниця.

Підставляючи функції (5) у формули (2), знаходимо вирази для компонент переміщень:

$$\begin{aligned} U &= [(3-4\nu)R(\rho) - \rho R'(\rho) - Q'(\rho)]e^{i\beta\xi}, \\ W &= -[\rho R(\rho) + Q(\rho)]i\beta e^{i\beta\xi}. \end{aligned}$$

Згідно з законом Гука вирази для напружень мають вид:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 2\mu \left(\frac{\nu\theta}{1-2\nu} + \frac{\partial U}{\partial r} \right), & \sigma_\varphi &= 2\mu \left(\frac{\nu\theta}{1-2\nu} + \frac{U}{r} \right), \\ \sigma_z &= 2\mu \left(\frac{\nu\theta}{1-2\nu} + \frac{\partial W}{\partial z} \right), & \tau_{rz} &= \mu \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r} \right),\end{aligned}$$

де θ – об’ємне розширення, яке в циліндричних координатах виражається наступним чином:

$$\theta = \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} + \frac{\partial W}{\partial z},$$

або

$$\theta = \frac{2(1-2\nu)}{r_0} \left(R'(\rho) + \frac{R(\rho)}{\rho} \right),$$

а вирази для напружень після проведення відповідних перетворень у дійсній формі набудуть вигляду:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -\frac{2\mu}{r_0} \left[\left((3-2\nu)\beta K_0(\beta\rho) + \left(4(1-\nu)\frac{1}{\rho} + \beta^2\rho \right) K_1(\beta\rho) \right) C + \right. \\ &\quad \left. + \beta \left(\beta K_0(\beta\rho) + \frac{1}{\rho} K_1(\beta\rho) \right) D \right] (f \cos \beta\xi + g \sin \beta\xi); \\ \sigma_\varphi &= \frac{2\mu}{r_0} \left[\left((1-2\nu)\rho K_0(\beta\rho) + 4(1-\nu)\frac{1}{\rho} K_1(\beta\rho) \right) C + \frac{\beta}{\rho} K_1(\beta\rho) D \right] (f \cos \beta\xi + g \sin \beta\xi); \\ \sigma_z &= \frac{2\mu}{r_0} \left[(\beta^2\rho K_1(\beta\rho) - 2\nu\beta K_0(\beta\rho)) C + \beta^2 K_0(\beta\rho) D \right] (f \cos \beta\xi + g \sin \beta\xi); \\ \tau_{rz} &= \frac{2\mu}{r_0} \left[(\beta\rho K_0(\beta\rho) + 2(1-\nu)K_1(\beta\rho)) C + \beta K_1(\beta\rho) D \right] \beta (g \cos \beta\xi - f \sin \beta\xi),\end{aligned}$$

де $K_0(\beta\rho)$, $K_1(\beta\rho)$ – модифіковані функції Ганкеля, а C , D , f , g – довільні сталі.

Граничні умови (4) представимо інтегралом Фур’є:

$$\begin{aligned}\sigma_r(\xi)|_{\rho=1} &= -\frac{2p_0}{\pi} \int_0^\infty \cos \beta\xi \cdot \frac{\sin \beta b}{\beta} d\beta; \\ \tau_{rz}(\xi)|_{\rho=1} &= -\frac{1}{\pi} \int_0^\infty [a_1(\beta) \cos \beta\xi + a_2(\beta) \sin \beta\xi] \cdot \frac{d\beta}{\beta}; \\ a_1(\beta) &= (\tau_1 + \tau_2) \sin \beta b, \quad a_2(\beta) = -(\tau_1 - \tau_2) \left(\frac{\sin \beta b}{\beta b} - \cos \beta b \right).\end{aligned}$$

Загальний розв'язок, виражений в формі інтегралів Фур'є, буде являти собою суму розв'язків, зумовлених дією окремо нормального і дотичного напружень:

$$\sigma_r = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \left[\left((3-2\nu)K_0(\beta\rho) + \left(4(1-\nu)\frac{1}{\beta\rho} + \beta\rho \right) K_1(\beta\rho) \right) \times \right. \\ \left. \times ((C_1 p_0 \sin \beta b - C_2 a_2(\beta)) \cos \beta\xi + C_2 a_1(\beta) \sin \beta\xi) + \right. \\ \left. + \left(\beta K_0(\beta\rho) + \frac{1}{\rho} K_1(\beta\rho) \right) ((D_1 p_0 \sin \beta b - D_2 a_2(\beta)) \cos \beta\xi + D_2 a_1(\beta) \sin \beta\xi) \right] d\beta,$$

$$\sigma_\varphi = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \left[\left((1-2\nu)\frac{\rho}{\beta} K_0(\beta\rho) + 4(1-\nu)\frac{1}{\beta\rho} K_1(\beta\rho) \right) \times \right. \\ \left. \times ((C_1 p_0 \sin \beta b - C_2 a_2(\beta)) \cos \beta\xi + C_2 a_1(\beta) \sin \beta\xi) + \right. \\ \left. + \frac{1}{\rho} K_1(\beta\rho) ((D_1 p_0 \sin \beta b - D_2 a_2(\beta)) \cos \beta\xi + D_2 a_1(\beta) \sin \beta\xi) \right] d\beta,$$

$$\sigma_z = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \left[(\beta\rho K_1(\beta\rho) - 2\nu K_0(\beta\rho)) \times \right. \\ \left. \times ((C_1 p_0 \sin \beta b - C_2 a_2(\beta)) \cos \beta\xi + C_2 a_1(\beta) \sin \beta\xi) + \right. \\ \left. + \beta K_0(\beta\rho) ((D_1 p_0 \sin \beta b - D_2 a_2(\beta)) \cos \beta\xi + D_2 a_1(\beta) \sin \beta\xi) \right] d\beta,$$

$$\tau_{rz} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \left[(\beta\rho K_0(\beta\rho) + 2(1-\nu)K_1(\beta\rho)) \times \right. \\ \left. \times (- (C_1 p_0 \sin \beta b - C_2 a_2(\beta)) \sin \beta\xi + C_2 a_1(\beta) \cos \beta\xi) + \right. \\ \left. + \beta K_1(\beta\rho) (- (D_1 p_0 \sin \beta b - D_2 a_2(\beta)) \sin \beta\xi + D_2 a_1(\beta) \cos \beta\xi) \right] d\beta.$$

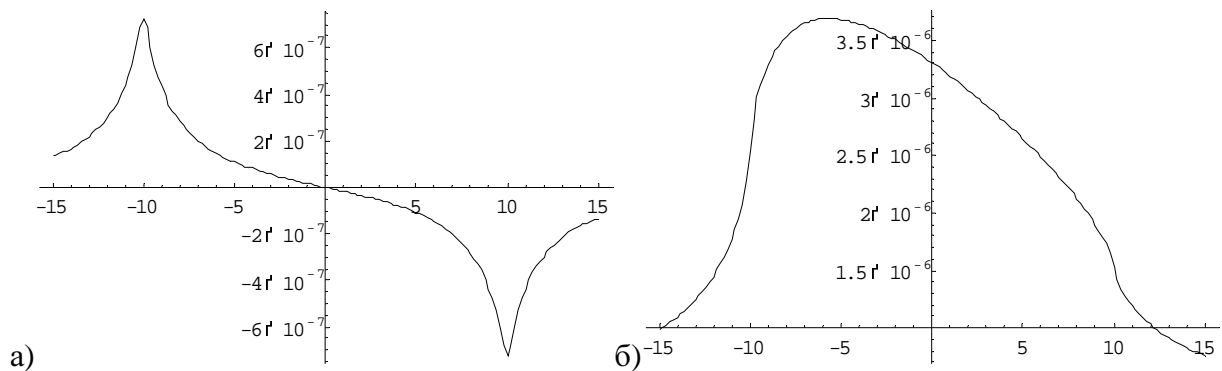
Вирази для переміщень у радіальному напрямі і вздовж осі симетрії при цьому набувають вигляду

$$U = \frac{r_0}{\pi\mu} \int_0^{\infty} \left[\left(4(1-\nu)\frac{\rho}{\beta} K_1(\beta\rho) + \rho K_0(\beta\rho) \right) \times \right. \\ \left. \times ((C_1 p_0 \sin \beta b - C_2 a_2(\beta)) \cos \beta\xi + C_2 a_1(\beta) \sin \beta\xi) + \right. \\ \left. + K_1(\beta\rho) ((D_1 p_0 \sin \beta b - D_2 a_2(\beta)) \cos \beta\xi + D_2 a_1(\beta) \sin \beta\xi) \right] d\beta,$$

$$W = \frac{r_0}{\pi\mu} \int_0^{\infty} \left[(\rho K_1(\beta\rho)) ((C_1 p_0 \sin \beta b - C_2 a_2(\beta)) \sin \beta\xi - C_2 a_1(\beta) \cos \beta\xi) + \right. \\ \left. + K_0(\beta\rho) ((D_1 p_0 \sin \beta b - D_2 a_2(\beta)) \sin \beta\xi - D_2 a_1(\beta) \cos \beta\xi) \right] d\beta.$$

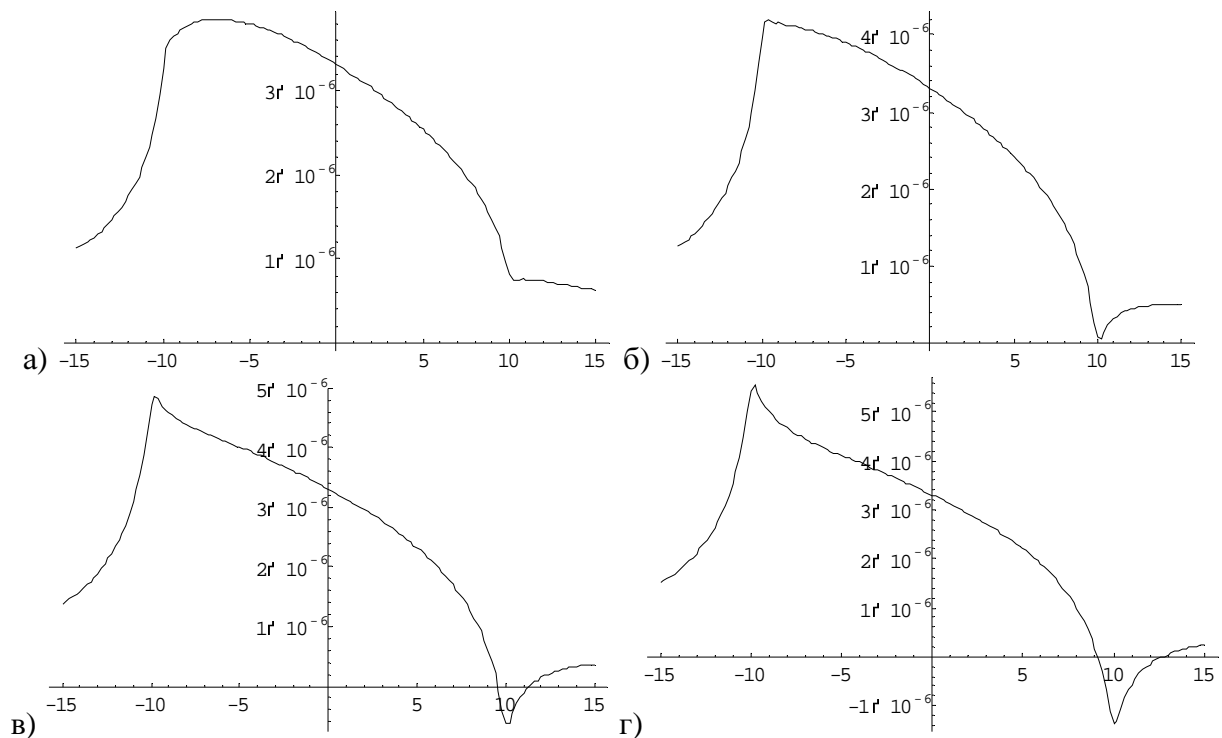
Інтегрування цих виразів дало змогу отримати графічне зображення деформованого стану у околі шпура. Так, залежності зміни переміщень вздовж осі шпура від величини внутрішнього тиску представлені на рис. 2а, б, 3а, б. Розрахунки виконано за такими початковими даними: діаметр шпура $d = 0,032$ м; довжина зафіксованої частини шпура – $l_0 = 0,32$ м; модуль пружності гірської породи – $E = 10$ ГПа; коефіцієнт поперечної деформації – $\nu = 0,25$; початкове значення внутрішнього тиску – $p_0 = 100$ т/м²; а сила осьового навантаження $P = 1,0$ т.

Результати дослідження впливу внутрішнього тиску p_0 і величини осьових навантажень P на поздовжні W і поперечні U переміщення представлені на рис. 2-7. Графіки розподілу деформацій за відмінними від вказаних навантажень супроводжуються додатковими поясненнями (рис. 2, рис. 4).



а) за відсутності осьових зусиль $P = 0$; і наявності нормального тиску на поверхню шпура $p_0 = 100$ т/м²; б) за відсутності нормального тиску. $p_0 = 0$; і наявності осьових навантажень $P = 1,0$ т

Рис. 2 – Вплив зміни типу навантажень на поздовжні переміщення W у околі зафіксованої частини шпура



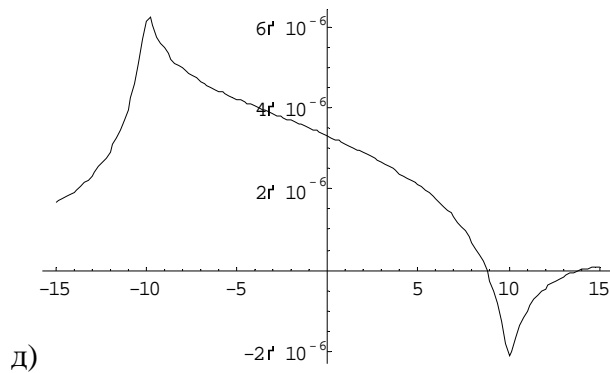
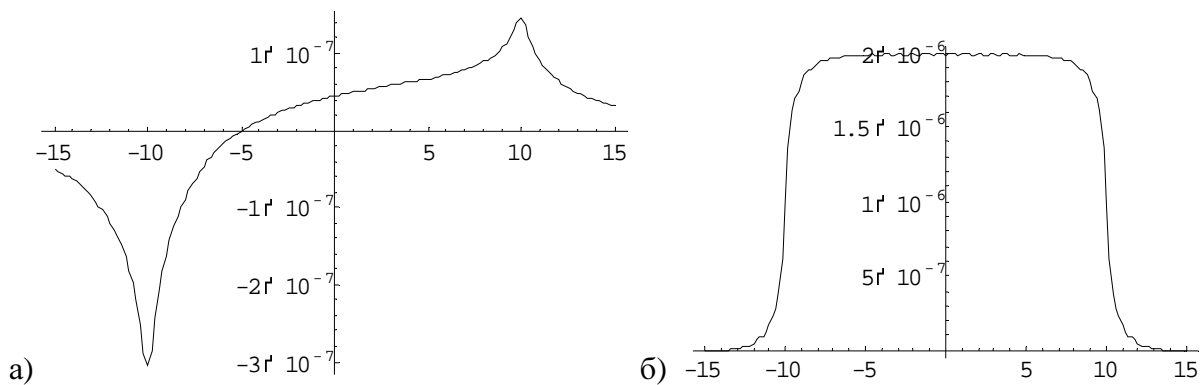


Рис. 3 – Вплив зміни тиску на поздовжню деформацію у околі зафіксованої частини шпура

Графіки розподілу осьових переміщень вздовж зафіксованої частини шпура при зміні тиску представлені вище (рис. 2, 3). Причому, слід зауважити, що розподіл деформацій представлено для таких закономірностей зміни величин нормального тиску p_0 : а) $P + p_0$; б) $P + 2 p_0$; в) $P + 3 p_0$; г) $P + 4 p_0$; д) $P + 5 p_0$.



а) за відсутності осьових зусиль $P = 0$; і наявності нормального тиску на поверхню шпура $p_0 = 100 \text{ т/м}^2$; б) за відсутності нормальних напружень. $p_0 = 0$; і наявності осьових навантажень $P = 1,0 \text{ т}$;

Рис. 4 – Вплив зміни тиску на радіальні переміщення U у околі зафіксованої частини шпура.

Графіки на рис. 3 демонструють вплив росту внутрішнього тиску на переміщення поверхневого шару гірської породи у околі шпура. З його зростанням величина переміщень збільшується, а характер розподілення виявляє кососиметричний характер. Максимальних значень переміщення набувають у межових зонах частини шпура, який сприймає навантаження. Виявлений характер розподілення переміщень вздовж осі шпура демонструє відповідність фізичним уявленням про процес деформації стінок шпура [6].

Залежність радіальних переміщень у околі шпура від зміни тиску приведені на рис. 4, 5.

Вплив зміни осьових навантажень анкера на деформований стан гірської породи у околі зафіксованої частини шпура на поздовжню і поперечну деформацію представлено на рис. 6-7. Слід зауважити, що розподіл деформацій, зображений на рисунках, відповідає наступним величинам осьового навантаження: а) $P + p_0$; б) $2P + p_0$; в) $3P + p_0$; г) $4P + p_0$.

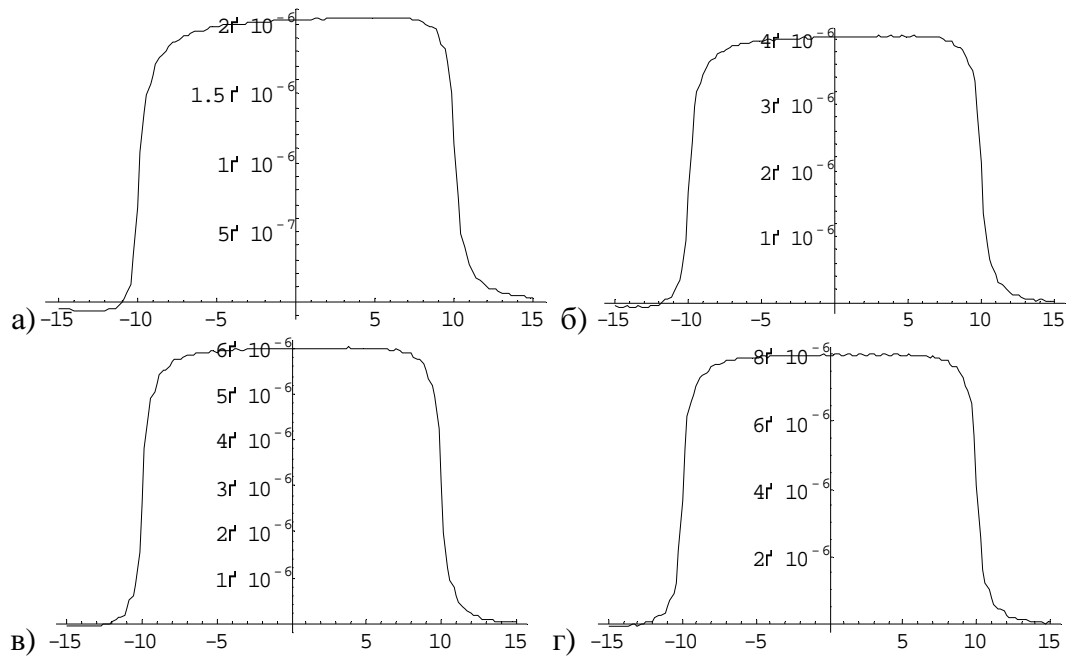


Рис. 5 – Вплив зміни тиску на радіальні переміщення U у околі зафіксованої частини шпура.

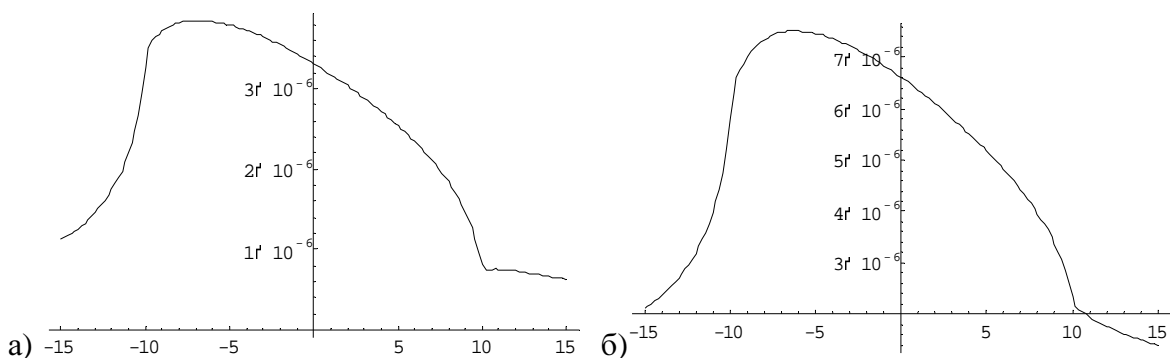
Так на рис.6 представлено вплив зміни осьових навантажень анкера у околі зафіксованої частини шпура на поздовжнє переміщення

Висновки:

– абсолютні значення осьових переміщень масиву гірських порід у околі шпура при зміні осьових навантажень P у межах від 1.0 до 5.0 тон змінюються у межах $(2 - 18) \cdot 10^{-6}$ м., поперечні ж переміщення при цьому залишаються сталими. При зміні внутрішнього тиску у межах 100 -500 т/м² поперечні переміщення лежать у межах $(2 - 8) \cdot 10^{-6}$ м., а поздовжні у межах $(3 - 6 \cdot 10)^{-6}$ м. Наведені результати в повній мірі відповідають закону Гука ;

– зміна осьових навантажень не впливає на величини поперечних переміщень, а зміна внутрішнього тиску призводить до зміни, як поздовжніх, так і поперечних переміщень.

Оскільки характер розподілу осьових і поперечних переміщень відповідає фізичним уявленням про процеси деформацій у околі свердловини при зміні типу навантаження масиву гірських порід, це дає підстави стверджувати, що даний підхід є ефективним для обчислення деформованого стану.



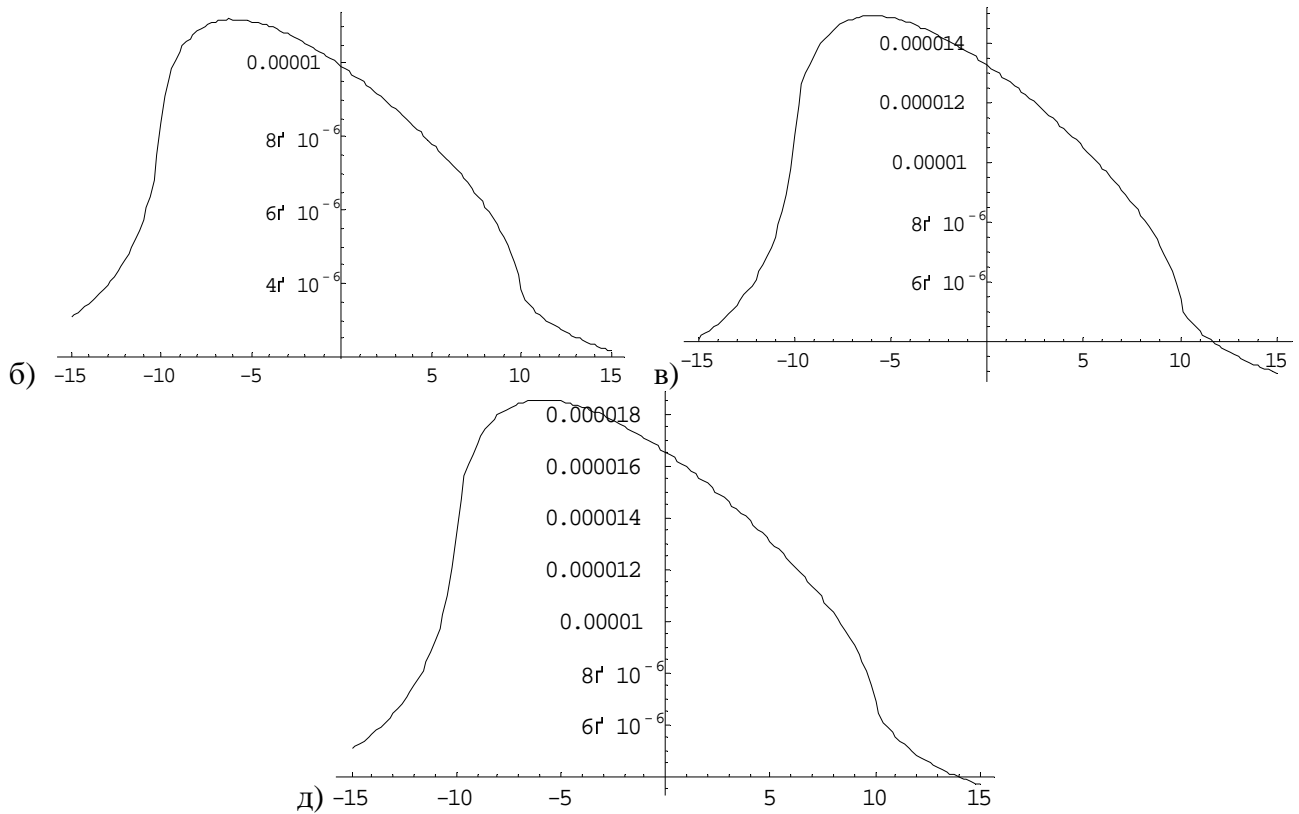


Рис. 6 – Вплив зміни осьових навантажень анкера на повздовжнє переміщення W у околі зафіксованої частини шпура.

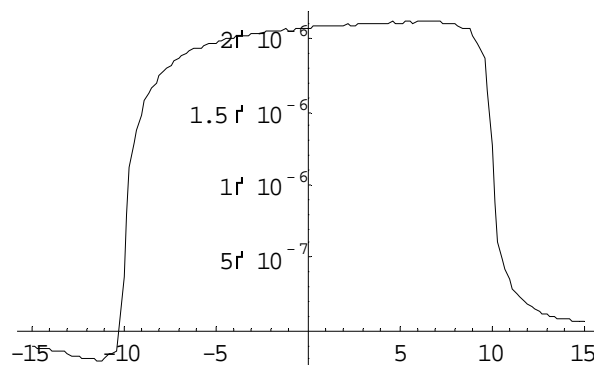


Рис. 7 – Вплив зміни осьових навантажень анкера на радіальні переміщення U у околі зафіксованої частини шпура.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Булат А.Ф., Виноградов В.В. Опорно-анкерне кріплення гірничих виробок вугільних шахт/ Ін-т геотехнічної механіки НАН України. – Дніпропетровськ, 2002. – С. 372.
2. A. Campoli. Variables affecting polyester resin anchorage performance with United States roof bolting system/ AIMS (Aachen International Mining Symposia).6 and 7.Junlay,2001, P. 19-28.
3. T. Lautsh. Roof bolting in three continents-a comparison/ AIMS (Aachen International Mining Symposia).6 and 7 Junlay, 2001, P. 59-76.
4. Горбачев Т.Ф., Штумпф Г.Г., Стрыгин Б.И. Применение анкерной крепи в подготовительных выработках. Новосибирск, Наука, 1972. – 296 с.
5. Y. Cai, Y.J. Jiang, T. Esaki. A study of rock bolting design in soft rock / Int.J.Rock Mech. Min. Sci, Vol. 41. No.3, P. 1-6.
6. Ларіонов Г.І., Павлишин С.М., Головка С.А., Буліч Ю.Ю. Про деформований стан масиву гірських порід у околі навантаженого по осі анкера. Зб.наук.праць НГУ №22 – Дніпропетровськ: РВК НГУ,2005. – С. 48-55.