ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 622.235.575.2

СЕЙСМІЧНИЙ ВПЛИВ ГІРСЬКОГО УДАРУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ РОЗВИТКУ МУЛЬДИ ОСІДАННЯ

О. О. Вовк, докт. техн. наук, О. О. Вовк, канд. техн. наук, Т. В. Косенко, інж., А. В. Солдатова, студ. (НТУУ «КПІ»)

Описываются условия стойкости откосов при сейсмическом воздействии горного удара в зависимости от механических характеристик грунтов.

Ключевые слова: деформация поверхности, мульда оседания, сейсмические колебания.

Описуються умови стійкості укосу при сейсмічній дії гірського удару в залежності від механічних характеристик грунтів.

Ключові слова: деформація поверхні, мульда осідання, сейсмічні коливання.

Slope stability conditions at seismic influence of shock bump depending on mechanical soil characteristics are described.

Keywords: deformation of surface, subsidence trough, seismic vibrations.

Вступ. Розробка родовищ підземним способом негативно впливає на земну поверхню, викликаючи її осідання, змінюючи ландшафт та геологічне середовище. Вона супроводжується утворенням пустот у гірському масиві, порушенням рівномірного напруженого стану і створенням осередків концентрації напружень, руйнуванням і зсувами гірських порід навколо пустот.

Постановка задачі. Зсуви порід досягають денної поверхні і спричиняють осідання ґрунту під поверхневими будівлями і природними об’єктами (водоймища, береги річок), викликаючи деформації, що призводять до руйнування цих об’єктів. Особливо небезпечні ці процеси в поєднанні з сейсмічною дією вибухових робіт, землетрусів або гірських ударів.

Останні небезпечні як для підземних виробок, так і для поверхні землі, що досліджується, разом з будівлями і спорудами на ній. Потрібно зазначити, що із зростанням глибини розробки вугільних і рудних покладів кількість, енергетична потужність і шкідливий вплив гірських ударів зростають.

Мета дослідження. Визначити умови стійкості укосу при сейсмічній дії гірського удару в залежності від механічних характеристик грунтів.

Результати дослідження. Вплив гірських ударів на об’єкти, які розташовуються над підроблюваними територіями або в околі шахтного поля, проявляється у вигляді сейсмічних пружних коливань, що взаємодіють з ґрунтами основ фундаментів і гірських схилів. Ці прояви особливо небезпечні в районі мульди осідання, коли поверхня зазнає різних деформацій з втратою рівноважного стану або досягненням граничних станів. У цьому випадку

додаткові динамічні навантаження, самі по собі далекі від граничних рівнів, можуть викликати лавинні ґрунтові потоки в основах поверхневих об'єктів. Додатковим негативним чинником, що має бути врахований, є ймовірність посилення вібросейсмічного сигналу за рахунок резонансу низькочастотних коливань (а вони переважають в спектрі коливань на великих відстанях від осередку удару) з власною частотою ґрунтових агрегатів, здатного привести деформований стан у граничний.

Деформації поверхні головної частини мульди визначаються фізико-механічними властивостями порід над виробленим простором. Стійкість бокових укосів мульди осідання залежить також від фізико-механічних властивостей порід і характеризується постійним кутом зсуву, що забезпечує рівноважний стан укосу. При взаємодії сейсмічних імпульсів з головною частиною мульди процес деформації її поверхні прискорюється, стійкість бокових укосів може бути порушена, і гранична крутизна їх зміниться. Розглянемо умови стійкості укосу в залежності від механічних характеристик грунтів. Для оцінки напружено-деформованого стану укосів необхідно визначити вертикальні і горизонтальні складові тиску, від співвідношення яких залежить у кінцевому підсумку стійкість укосів і їх гранична крутизна. В найбільш загальному випадку, коли укос складається з декількох різнорідних грунтових шарів, компоненти напружень від власної ваги грунту можуть бути записані таким чином:

вертикальні напруження $$\sigma_{zi} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i z_i ; \qquad (1)$$

горизонтальні напруження $$\sigma_x = \sigma_y = \sum_{i=1}^{n} \xi_i \gamma_i z_i ; \qquad (2)$$

в однорідному грунті $$\sigma_x = \sigma_y = \xi \sigma_z = \frac{\mu_0}{1-\mu_0} \gamma \cdot z ; \qquad (3)$$

дотичні напруження $$\tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 ; \qquad (4)$$

де γ_i – щільність грунту; μ_0 – коефіцієнт Пуассона.

Відношення горизонтального тиску $\sigma_{\text{гор}}$ і вертикального тиску $\sigma_{\text{вер}}$ у виділеному елементі гірського масиву знаходять з виразу

$$\frac{\sigma_{\text{гор}}}{\sigma_{\text{вер}}} = \text{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \qquad (5)$$

де φ – кут внутрішнього тертя.

Якщо коефіцієнт зчеплення *C* не дорівнює 0, значення горизонтальних і вертикальних тисків у відповідності з умовою міцності Кулона–Мора обчислюється співвідношеннями

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{вер}} &= \sigma_z + \frac{C}{\text{tg}\varphi}; \\ \sigma_{\text{гор}} &= \sigma_x + \frac{C}{\text{tg}\varphi}. \end{aligned} \qquad (6)$$

Зсувні горизонтальні зусилля в елементах укосу $G_{S.ij}$ при $y \neq 0$ і $C \neq 0$ дорівнюють

$$G_{S.ij} = \sigma_{\text{гор}.ij} \cdot A_{\text{гор}.i}, \tag{7}$$

де $A_{\text{гор}.i}$ – площа, на яку в виділеному елементі грунтового масиву діють горизонтальні зсувні зусилля.

Стискальні вертикальні сили $G_{\text{ст}.ij}$ з урахуванням площі $A_{\text{вер}.i}$, на яку діє вертикальне стискальне зусилля (тобто горизонтальне утримуюче з усилля), визначаються з урахуванням (6):

$$G_{\text{ст.ij}} = \frac{\left(\sigma_{\text{вер}.ij} + \dfrac{C_i}{\text{tg}\varphi_i}\right) \cdot A_{\text{вер}.i}}{A_{\text{гор}.i}} \cdot \xi_i, \tag{8}$$

де ξ_i – коефіцієнт активного тиску грунту в кожному елементі згідно з (5).

Стійкість кожного елемента в масиві укосу визначається за допомогою коефіцієнта запасу η_{ij}:

$$\eta_{ij} = \frac{G_{\text{ст}.ij}}{G_{S.ij}}, \tag{9}$$

а в цілому найбільш характерним параметром стану укосу є кут зсуву (стійкості). Наприклад, якщо укос складається з піщаного грунту при C = 0, то цей кут дорівнює куту внутрішнього тертя φ, тобто $\alpha = \varphi$. У випадку, коли розглядається стійкість укосу в зв'язних грунтах з коефіцієнтом зчеплення $C \neq 0$, зсув відбувається під кутом, значно більшим, ніж кут внутрішнього тертя φ.

Отже, у зв'язних глинистих грунтах за рахунок сили зчеплення укос може бути стійким під кутом різної величини, в тому числі навіть під кутом 90°, при висоті h, що не перевищує співвідношення

$$h_{90^\circ} = \frac{2C}{\gamma}. \tag{10}$$

Граничну висоту вертикального відслонення, при якій вже з'являються площини ковзання, знаходять за узагальненою формулою

$$H_{90^\circ} = \frac{2C}{\gamma} \cdot \text{ctg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right). \tag{11}$$

Виположування укосу (тобто зсув укосу під тим чи іншим кутом, меншим за 90°) при порушенні рівноважного стану можливе шляхом збільшення висоти укосу або прикладання додаткових зусиль, наприклад дією сейсмічних коливань, викликаних гірським ударом.

Врахування дії сейсмічних зусиль визначатимемо таким чином. Вплив інерційних сил на зміну коефіцієнта стійкості, згідно з М. М. Масловим,

визначається як відношення сумарних сил тертя і зчеплення до сумарних зсувних сил інерції (що характеризують сейсмічну дію). Інерційна сейсмічна сила $S_с$ дорівнює [4]

$$S_с = \frac{a}{g} P, \tag{12}$$

де a – сейсмічне прискорення; g – прискорення земного тяжіння; P – вага призми обвалення.

Відношення $\frac{a}{g}$ назвемо коефіцієнтом струсу $K_с$ і (12) запишемо як $S_с = \pm K_с \cdot P$, а вертикальну $S_{св}$ і горизонтальну $S_{сг}$ складову відповідно:

$$\begin{aligned} S_{св} &= \pm S_с \cdot \sin\theta; \\ S_{сг} &= \pm S_с \cdot \cos\theta, \end{aligned} \tag{13}$$

де θ – кут напрямку вектора сейсмічного імпульсу до горизонту;

$$a = 4\pi^2 f^2 A; \tag{14}$$

де A і f – амплітуда і частота коливань.

Вплив вертикальної і горизонтальної складової сейсмічного прискорення на стійкість укосу різний. Вертикальна складова $S_{св}$ розвантажує гравітаційну силу призми обвалення, а горизонтальна $S_{сг}$ збільшує зсувні сили вздовж поверхні призми обвалення.

Наслідком цих зусиль може бути зменшення значення коефіцієнта стійкості або порушення стану рівноваги з початком руху призми обвалення.

Згідно з [4] оцінка дії сейсмічних сил на зміну стійкості укоса може бути представлена у вигляді зміни крутизни на відповідну частину кута зсуву.

Для попередньої оцінки величину прискорення a можна приймати в залежності від балу $\Delta Б$ сейсмічних коливань (наприклад, величині $\Delta Б$ = 8 відповідає прискорення a = 1200…2400 мм/с).

Що стосується впливу сейсмічних коливань на процес формування головної частини мульди осідання, то головним наслідком цього впливу слід вважати збільшення розтяжних або стискальних деформацій на додачу до тих, що викликані гравітаційними полями. Для попередньої оцінки можна використати метод Лангоффса, згідно з яким при низьких частотах (до 10 Гц), характерних для сейсмоколивань у поверхневих хвилях, критерієм руйнування по фактору граничної деформації $E_{гр}$ є співвідношення

$$E_{гр} = \frac{\vartheta}{C}, \tag{16}$$

де ϑ – швидкість коливань; C – швидкість звуку в породі.

Швидкість сейсмічних коливань, що спричиняються гірським ударом, залежить від енергетичних і геометричних параметрів осередку удару, глибини

виникнення удару та властивостей товщі порід над осередком. Вона або знаходиться із запису гірського удару, що вже відбувся, або обчислюється за формулою [5]

$$\vartheta = 1{,}265\sqrt{\frac{E_r}{\rho\vartheta_{\text{р}}T}}, \tag{17}$$

де E_r – густина енергії в залежності від відстані r до осередку удару, обчислюється з виразу [5], Дж/м^2,

$$E_r = 1{,}75 \cdot E_{rn} \cdot r^{-3,2}, \tag{18}$$

де E_{rn} – густина сейсмічної енергії на поверхні сейсмовипромінювача радіусом $r_{\text{в}}$, яка дорівнює

$$E_{rn} = \frac{E_{\text{с}}}{4\pi r_{\text{в}}^2}, \tag{19}$$

де $E_{\text{с}}$ – сейсмічна енергія гірського удару; $\vartheta_{\text{р}}$ – швидкість руху сейсмічних хвиль; ρ – густина породи; T – період коливань, може бути знайдений з виразу $T = 1{,}45 \cdot 10^{-3} \cdot r_{\text{в}}^{1,15}$.

Масова швидкість ϑ, згідно з (17), обчислена на межі скельних порід і наносів. Для отримання їх значення при русі хвилі по наносах необхідно враховувати їх динамічні властивості шляхом застосування коефіцієнта перелому $K_{\text{п}}$, що дорівнює:

$$K_{\text{п}} = \frac{2\rho_1 V_{P_1}}{\rho_1 V_{P_1} + \rho_2 V_{P_2}}, \tag{20}$$

де $\rho_1 V_{P_1}$ і $\rho_2 V_{P_2}$ – густина і швидкість поздовжніх хвиль скельних порід і наносів.

Крім того, необхідно враховувати збільшення масової швидкості в сейсмічній хвилі при відбитті її від вільної поверхні. Отже, кінцеве значення масової швидкості буде знайдене шляхом множення результату обчислення за формулою (17) на подвоєний коефіцієнт перелому, тобто на $2K_{\text{п}}$. З наведеного вище випливає, що взаємодія сейсмічних коливань, викликаних гірським ударом, з деформованою підземними розробками поверхнею землі призводить до негативних наслідків, зокрема до порушення стійкості бічних укосів і прискорення деформацій головної частини мульди опускання.

Висновок

Вплив гірських ударів на об’єкти, які розташовуються над підроблюваними територіями або в околі шахтного поля, проявляється у вигляді сейсмічних пружних коливань, що взаємодіють з ґрунтами основ фундаментів і гірських схилів. Особливо небезпечними ці прояви є в районі

мульди осідання. В даній статті розглянуто формули для визначення напружено-деформованого стану бокових укосів мульди осідання, які залежать від фізико-механічних властивостей порід і характеризуються сталим кутом зсуву.

1. *Chudek M.* Geomechanika z podstawami o chrony srodowiska gorniczego i powiezchni terenu / Chudek M. – Glivice: Wydawnictwo Politechniki staskiej, 2002. – 637 s.

2. *Вовк А. А., Воеводка А., Кужея Е.* Некоторые проблемы экологии в горнодобывающей промышленности. Ч. 6. – К.: Национальный технический университет Украины «КПИ», институт гидромеханики НАН Украины, 1996. – С. 123–126.

3. *Вовк А. А., Воеводка А., Кужея Е.*. Некоторые проблемы экологии в горнодобывающей промышленности. Ч. II. – К.: Национальный технический университет Украины «КПИ», институт гидромеханики НАН Украины, 1996. – 154 с.

4. *Кугель М.* Розробка методів прогнозування і попередження зсувів в укосах на підроблюваних територіях: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Кугель М. – К.: Ін-т гідромеханіки НАН України, 2002. – 16 с.

5. *Павуков В. А.* Горная механика / В. А. Павуков – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова. – 1997. – 134 с.

6. *Chudek M.* O propogacji energii sejsmicznej przy procesach dynamicznych / M. Chudek, A. A. Wowk, A. A. Kuzmenko. – K.: Zeszyty naukowe Politechniki staskiej. – Gornictwo. – Z. 258. – Glivice. – 2003. – S. 59–69.