

Передмова

Виробнича діяльність гірничих інженерів-маркшейдерів пов'язана з визначенням та керуванням параметрів гірничих виробок в кар'єрі. Параметри гірничих виробок суттєво впливають як на загальні техніко-економічні параметри розробки так і на безпеку ведення гірничих робіт. Стійкість бортів кар'єрів, уступів кар'єрів та відвалів має ключове значення в забезпеченні безпеки умов праці на гірничому виробництві.

Тому для майбутніх гірничих інженерів дуже важливо вміти здійснювати розрахунок стійкості бортів кар'єрів та уступів, оцінювати можливість та параметри зрушення, а також вміти розв'язувати ряд практичних задач пов'язаних зі стійкістю гірських порід.

Дані методичні вказівки розглядають:

- основні фактори, які впливають на стійкість відкосів кар'єрів;
- теоретичне ознайомлення студентів з основними поняттями і термінами;
- основні властивості міцності гірських порід та масиву;
- фізико-технічні властивості, порід за вказаними початковими даними;
- побудову можливої поверхні зсуву уступу за допомогою методу Г.Л. Фісенко;
- побудову стійкого відкосу увігнутого профілю методом В.В. Соколовського;
- побудови відкосу уступу випуклого та плоского профілю;
- розрахунок стійкості багатоярусного відвалу;

Результатом засвоєння даного матеріалу є розвиток у майбутнього фахівця уміння розраховувати параметри стійкого відкосу борта кар'єру та відвалів.

1. Коротка характеристика факторів, які впливають на стійкість відкосів кар'єрів

На стійкість відкосів впливають багаточисельні фактори: геологічні, гідрогеологічні, гірничо-технічні, а також кліматичні умови.

Стійкість відкосів зменшується із зменшенням характеристик опору на зсув (зчеплення і внутрішнього тертя), та із збільшенням тріщинуватості порід і кількістю розривних геологічних порушень.

Утворення поверхней ковзання та їх розміщення в масиві в значній мірі залежить від орієнтування поверхней ослаблення, в тому числі шаруватості, сланцюватості, тектонічного порушення; ці фактори часто є вирішальними при оцінюванні стійкості відкосів.

Суттєвий вплив на стійкість відкосів здійснюють водоносні шари порід (горизонти), водойми, відкриті та підземні водотоки поблизу кар'єру. Слід зауважити, що гідростатичний тиск, який діє на поверхню ковзання, зменшує нормальну складову ваги порід, що призводить до зменшення сил тертя і, в кінцевому результаті, до зниження стійкості відкосів.

Кліматичні умови району родовища впливають на вивітрювання порід, наслідком якого є зменшення їх міцності та стійкості у відкосах.

На стійкість уступів і бортів кар'єрів також впливають гірничо-технічні умови: висота бортів і уступів, кути відкосів, ширина площадок, конфігурація бортів в плані та в розрізі, спосіб проведення буровибухових робіт.

На стійкість відвалів суттєво впливають: кут нахилу площадки основи відвалу, обводненість порід основи та відвальних порід, технологія формування відвалів.

2. Основні поняття і терміни

Борт кар'єру – бокова поверхня, яка обмежує кар'єр і його вироблений простір. Якщо на борті кар'єру проводять гірничі роботи, то він називається робочим бортом. В результаті гірничих робіт робочий борт кар'єру переміщується і наближається до проміжних або до кінцевих контурів кар'єру. Борт кар'єру або його окремі ділянки, контури яких співпадають з кінцевими контурами кар'єру, називається неробочим. На неробочому борті кар'єру гірничі роботи не проводяться, але можуть розміщуватись транспортні з'їзди.

Прибортний масив – частина масиву гірських порід заключена між бортом кар'єру і поверхнею, яка обмежує область мікропросувань

в масиві в період прихованої стадії розвитку зсуву (обвалу). Параметри прибортового масиву залежать від міцності та структурних характеристик гірничого масиву.

Відкос – похила або вертикальна поверхня відкритої гірничої виробки або штучного насипу (відвалу).

Деформація гірських порід – зміна форми, розмірів і об'єму моноліту або ділянок масиву гірських порід під дією різних сил (статичних або динамічних).

Небезпечні деформації гірських порід – деформації відвалів, уступів і бортів кар'єрів, а також прилеглих до кар'єру територій, які можуть викликати аварії гірничо-транспортного обладнання і загрожують безпеці проведення робіт на кар'єрі.

Коефіцієнт запасу стійкості – відношення суми всіх сил, які утримують відкос у рівновазі, до суми всіх сил, які намагаються вивести його з рівноваги; дія цих сил у всіх інженерних методах розрахунків стійкості відкосів переноситься на розрахункову або найбільш напружену поверхню ковзання.

Обвал – відривання та швидке зміщення вниз гірських порід, які складають відкос, яке супроводжується подрібненням масиву, який зміщується по поверхні, що співпадає з різними порушеннями суцільності масву.

Зсув – повільне, ковзаюче зміщення гірських порід, які складають відкос (часто і його основу), по нерухомому масиві. Зсув є найбільш крупним за розмірами видом порушення стійкості відкосів. Він пов'язаний головним чином з наявністю в товщі гірських порід слабких зволжених шарів, контактів, тектонічних порушень. Залежно від місця розвитку зсуву і будови порід деформуємого масиву виділяють зсуви бортів і уступів, зсуви відвалів, зсуви природних схилів.

Поверхня ковзання – поверхня в масиві борта кар'єру (відкосу уступу або відвалу), яка є геометричним місцем точок максимальних відносних зсувів гірських порід і відокремлює зміщувану частину від нерухомої частини масиву гірських порід.

Призма можливого обвалу борта кар'єру (відвалу, відкосу уступу) – частина масиву гірських порід (відвальних порід), яка розміщена між бортом кар'єру (відкосом уступу або відвалу) і найбільш напруженою поверхнею в масиві.

Ширина призми можливого обвалу – ділянка земної поверхні або площадки уступу між верхньою бровкою і контуром потенційної поверхні ковзання.

Кут внутрішнього тертя гірських порід – кут, тангенс якого дорівнює коефіцієнту внутрішнього тертя породи (кут нахилу прямолінійної частини графіку зсуву гірської породи до вісі нормальних напружень).

Кут природного відкосу – найбільший кут, який може бути утворений відкосом вільно насипаної гірничої маси в стані рівноваги з горизонтальною площиною; залежить від крупності і форми часток породи, шорсткості їх поверхні, а також від щільності і вологості породи.

Кут нахилу борта кар'єру – кут між умовною поверхнею, яка проходить через верхній та нижній контури кар'єру, і горизонтальною площиною.

Кут відкосу уступу – кут в площині, яка нормальна до простягання уступу, тобто кут між лінією, яка з'єднує верхню і нижню бровки уступу, і горизонтальною площиною.

Кут відкосу ярусу відвалу – кут в площині, яка нормальна до простягання відкосу відвалу, тобто кут між лінією, яка з'єднує верхню і нижню бровки ярусу відвалу, і горизонтальною площиною.

3. Мінерали і гірські породи. Основні поняття

Мінерал – це проста або складна природна хімічна сполука, що входить до складу земної кори, приблизно однорідна за складом і властивостям.

До мінералів відносяться також усі хімічні елементи, що знаходяться в земній корі у вільному стані (золото, сірка).

Мінерали можуть бути газоподібними (вуглекислий газ, метан, природний газ); рідкими (вода, ртуть, нафта); твердими (алмаз, антрацит).

Всі природні мінерал можна поділити на перигородні та штучні утворення. Серед природних утворень виділяють дві самостійні групи: органічні (бурштин, перли, корали, перламутр, гагат) та неорганічні мінерали.

Неорганічні мінерали класифікують за їх хімічним складом:

- *самородні прості речовини* – золото, срібло, платина, мідь, графіт, сірка, алмаз;
- *сульфіди і близькі до них сполуки* – пірит, галеніт, кіновар, сфалерит, халькозин;
- *оксиди і гідрооксиди* – кварц, піролюзит, корунд, куприт, гематит;

- *солі оксигеновмістних кислот* – нітрати, вольфрамати, сульфати (барит, ангідрит), хромати, вольфрамати і молібдати, фосфати (апатит, бірюза), карбонати (доломіт, кальцит) слікати (слюда, польові шпати, рогова обманка, тальк, пірофіліт, каолінит, топаз);
- *галогеїди* (галіт, флюорит, силвін).

Відомо більш 3000 мінералів, більшість із яких – тверді хімічні сполуки.

Основні фізичні властивості мінералів: твердість, блиск, форма поверхні зламу, спайність, колір, колір риски.

Гірські породи – це природні мінеральні агрегати щодо постійного мінералогічного і хімічного складу, що входять до складу земної кори і залягають в ній у виді самостійних геологічних тіл.

В утворенні гірських порід беруть участь біля 20 мінералів, що утворюють породу.

За характером зв'язків між мінеральними зернами гірські породи діляться на такі види:

- *пухкі (роздільно-зернисті)* – прості механічні суміші мінеральних зерен, не зв'язаних між собою (пісок, галька, гравій);
- *зв'язані (глинисті)* – мінеральні агрегати з водно-колоїдними зв'язками частинок між собою (глини, суглинки);
- *тверді (скельні)* – породи з жорстким або пружним зв'язком між частками окремих мінералів (пісковики, граніти, гнейси, діабаз).

Найважливішими ознаками будови порід є їх *структура і текстура*.

Структура визначається будовою (аморфна або кристалічна), розмірами і формою зерен і характером зв'язків між ними.

Основні типи структур:

- *кристалічна* (гігантозерниста з розміром зерен більше 10 мм; крупнозерниста з розміром зерен 5-10; середньозерниста з розміром зерен 1-5 мм; дрібнозерниста з розміром зерен менше 1 мм; афанітова, у якій зерна різняться тільки під збільшенням);
- *прихованокристалічна* (зерна не значні навіть при збільшенні);
- *склоподібна* (суцільна склоподібна маса);
- *порфірова* (в однорідну склоподібну або кристалічну масу вкраплені значні зерна);
- *пегматитова* (виникає при одночасній кристалізації двох мінералів, які закономірно проростають один в одного);

- уламкова (порода складається із зцементованих уламків).

Під *текстурою* гірської породи розуміють характер взаємного розташування її структурно однотипних частинок.

Найважливіші типи текстур:

- масивна (частинки породи не орієнтовані, щільно прилягають один до одного);
- пориста (частинки породи не щільно прилягають одна до одної, створюючи багато мікро пустот);
- шарувата (частинки чергуються, створюючи прошарки і нашарування).

За походженням (генезисом) гірські породи поділяються на три групи:

1. Магматичні (вивержені) породи, які утворилися в результаті охолодження і затвердіння магми. Залежно від місця кристалізації магми вони діляться на інтрузивні (глибинні) – граніт, діорит, габро та ефузивні (виливні) – діабаз, андезит, базальт.

За вмістом кремнезему SiO_2 магматичні породи поділяють на кислі (більше 65%), середні (52...65%), основні (40...52%) і ультраосновні (менше 40%).

2. Осадкові породи, які виникли у наслідок відкладення з води або повітря механічних, хімічних або органічних продуктів руйнування магматичних і метаморфічних порід (вапняки, пісковики, туфи).

3. Метаморфічні породи, які утворилися внаслідок глибокого перетворення магматичних або осадових порід під впливом високих тисків, температур і гарячих газових розчинів (кварцит, кристалічні сланці, гнейси, мармур).

В окрему групу виділяють пірокластичні (вулканогенно-уламкові) гірські породи, які утворилися внаслідок виливання та застигання лави на земній поверхні, тобто завдяки вулканічній діяльності. До таких гірських порід належать вулканічні туфи, вулканічні бомби, лапілі, вулканічний пісок.

4. Фізико-технічні властивості гірських порід

До фізико-технічних властивостей відносяться щільність, об'ємна маса, об'ємна і питома вага, насипна вага, пористість, кут природного відкосу, тріщинуватість, пластичність, крихкість.

Щільністю породи називається маса одиниці об'єму твердої фази (мінерального скелета).

Маса одиниці об'єму породи в її природному стані ρ називається *об'ємною масою*. Вона, як правило, менша щільності за рахунок того, що в структурі породи є пори.

Щільність породи визначається щільністю мінералів що її складають:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_{0i} V_i, \quad (1)$$

де n – число мінералів;

ρ_{0i} – щільність складового мінералу;

V_i – частка об'єму, що зайнятий складовим матеріалом.

Відношення сумарного об'єму пор наявних у породі до загального об'єму породи називається *загальною пористістю*

$$P = \frac{V_n}{V_n - V_m}, \quad (2)$$

де V_n – об'єм пор;

V_m – об'єм мінеральної частини.

Відношення сумарного об'єму пор до об'єму твердої фази (мінерального скелета) називається *коефіцієнтом пористості*

$$K_n = \frac{V_n}{V_m}. \quad (3)$$

Пори, що контактують з атмосферою, називають *відкритими*. Відношення об'єму відкритих пор $V_{відк}$ до загального об'єму породи називається *відкритою пористістю*

$$P_{отк} = \frac{V_{відк}}{V_n + V_m}. \quad (4)$$

Аналогічно, відношення об'єму *закритих* пор $V_{закр}$, тобто пор, що не мають сполучення з атмосферою, до загального об'єму породи називається *закритою пористістю*

$$P_{закр} = \frac{V_{закр}}{V_n + V_m}. \quad (5)$$

Відношення об'ємної маси до щільності називається *коефіцієнтом щільності*.

Об'ємна маса, щільність і пористість породи пов'язані між собою співвідношеннями

$$\begin{aligned} K_{пл} &= \frac{\rho}{\rho_0} = 1 - P; \\ \rho &= \rho_0(1 - P); \\ \rho_0 &= \rho(1 + K_n). \end{aligned} \quad (6)$$

Подібно щільності, розрізняють *об'ємну* і *питому* вагу породи, що пов'язані між собою через пористість P

$$\gamma = \gamma_0(1 - P). \quad (7)$$

Вага одиниці об'єму розпушеної гірської маси називають *насіпною вагою*.

$$\gamma_n = \frac{\gamma}{K_{розп}}, \quad (8)$$

Насіпна й об'ємна вага пов'язані через *коефіцієнт розпушення*, який визначається як відношення об'єму розпушеної маси $V_{розп}$ до об'єму породи в пласті $V_{пл}$

$$K_{розп} = \frac{V_{розп}}{V_{пл}}. \quad (9)$$

Розпушені породи характеризуються розміром кута *природного відкосу*, під яким розуміють кут, утворений вільною поверхнею насипаної розпушеної маси і горизонтальної площини.

Задача №1. Порода складається з мінералів: плагіоклазу, що займає $V_1 = 20\%$ загального об'єму; ортоклазу V_2 , %; кварцу V_3 , %; біотиту V_4 , %. Інша частина об'єму – пори. Причому відкриті пори складають 60% від загального їхнього об'єму.

Визначити: об'ємну масу породи; щільність породи; питому й об'ємну вагу породи, а також об'ємну вагу породи, яка максимально насичена водою.

Таблиця 1.

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вміст ортоклазу V_2 , %	33,00	34,00	35,00	36,00	37,00	38,00	39,00	40,00	41,00	42,00
Вміст кварцу V_2 , %	25,10	25,30	25,50	25,70	25,90	26,10	26,30	26,60	26,90	27,20
Вміст біотиту V_2 , %	9,50	9,30	9,10	8,90	8,70	8,50	8,30	8,10	7,90	7,70

Порядок розв'язання:

1. Об'єм, який зайнятий порами, %

$$P = 100\% - (V_1\% + V_2\% + V_3\% + V_4\%) \quad (10)$$

2. Об'ємна маса породи, кг/м³

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_{0i} V_i, \quad (11)$$

де ρ_{0i} – щільності мінералів, що складають породу:

плагіоклаз – $\rho_{0i} = 2670$ кг/м³,

ортоклаз – $\rho_{0i} = 2540$ кг/м³,

кварц – $\rho_{0i} = 2660$ кг/м³,

біотит – $\rho_{0i} = 2930$ кг/м³.

V_i – частина породи, що зайнята мінералом у частках від загального об'єму, %.

3. Щільність породи без врахування пор, кг/м³

$$\rho_0 = \frac{\rho}{1 - P}, \quad (12)$$

тут P – пористість, яка чисельно дорівнює об'єму, що зайнятий порами в частках від загального.

4. Об'ємна вага:

$$\gamma = \rho q, \quad (13)$$

де ρ – об’ємна маса породи, кг/м³;
 $q = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення сили тяжіння.

5. Питома вага породи, Н/м³

$$\gamma_0 = \rho_0 q, \quad (14)$$

де ρ_0 – щільність породи, кг/м³;
 $q = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення сили тяжіння.

6. Об’ємну вагу породи, яка максимально насичена водою, можна визначити як суму ваги мінеральної частини 1 м³ породи і ваги води, яка при насиченні нею породи розміститься у відкритих порах.

$$\gamma_{\text{нас}} = \gamma + G_{\text{в}}, \text{ Н/м}^3. \quad (15)$$

Вага мінеральної частини 1 м³ породи чисельно дорівнює об’ємній вазі, п. 4.

Вага води, що знаходиться у відкритих порах 1 м³ породи визначається:

$$G_{\text{в}} = 0,6P\gamma_{\text{в}}V, \text{ Н}, \quad (16)$$

де 0,6 – частка відкритих пор у загальному об’ємі, відповідно до умови задачі;

P – пористість породи в частках від загального об’єму;

$\gamma_{\text{в}} = 10000 \text{ Н/м}^3$ – об’ємна вага води;

$V = 1 \text{ м}^3$.

5. Механічні властивості гірських порід

Напруженням називається розмір внутрішніх сил, що припадає на одиницю площі, на якій вони діють.

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (17)$$

де F – діюча сила, Н;

S – площа, на якій діє сила, м^2 .

Напруження має розмірність Н/м^2 , що відповідає Паскалю.

Залежно від напрямку вектору напружень вони діляться на *нормальні* (спрямовані перпендикулярно аналізованій площадці) і *дотичні* (спрямовані уздовж аналізованої площадки).

Розрізняють *одноосовий* (лінійний), *двохосовий* (плоский) і *трихосовий* (об'ємний) напружені стани.

Зміна відносного положення частинок породи, що викликає зміну розмірів, об'єму або форми, називається *деформацією*.

Нормальні напруження викликають, як правило, зміну лінійних розмірів. Деформації в цьому випадку називаються лінійними й оцінюються відносною зміною лінійних розмірів:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (18)$$

де $\Delta l = l - l_0$ абсолютна деформація, що дорівнює різниці розміру l_0 до деформації і розміру l , отриманого після деформації.

Зв'язок між нормальним напруженням і деформацією описується співвідношенням:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (19)$$

Коефіцієнт пропорційності E , який має розмірність Па, називається *модулем пружності* або модулем Юнга.

Дотичні напруження викликають деформацію зсуву, що оцінюється кутом γ зсуву грані зразка породи.

Зв'язок між дотичним напруженням і деформацією зсуву здійснюється через *модуль зсуву* G .

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (20)$$

Дія нормальних напружень одного напрямку (повздовжніх) викликає виникнення в зразку нормальних напружень і відповідних деформацій у перпендикулярному напрямку (поперечних). Відношення відносних поперечних і повздовжніх деформацій називається *коефіцієнтом Пуассона*:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{\text{non}}}{\varepsilon_{\text{прд}}} = \frac{\Delta d l_0}{d_0 \Delta l}, \quad (21)$$

де d_0 і l_0 – відповідно поперечний і повздовжній розміри зразка до деформації;

Δd і Δl – відповідно абсолютні поперечна і повздовжня деформації.

Модуль зсуву, модуль пружності і коефіцієнт Пуассона пов'язані між собою.

Для ізотропних абсолютно пружних тіл, що знаходяться в умовах трьохосного рівномірного стиску, зв'язок між напруженням і відносними змінами об'єму виражається через *модуль об'ємного стиску*.

$$K = \frac{E}{3(1+2\mu)} \quad (22)$$

Для пухких порід зв'язок між нормальною напруженням і деформацією, яка відповідає йому виражається *через модуль одностороннього стиску*

$$M = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (23)$$

Деформації розрізняють *пружні* і *пластичні*. Перші зникають після зняття навантаження, другі – незворотні. Найбільше напруження, при якому деформації ще залишаються пружними, називається *межею пружності*.

Пластичність порід визначають по діаграмах “напруження-деформація” в умовах одноосного стиску.

Модулем пластичності або граничного січного модуля деформації називається відношення приросту напружень до розміру відносної деформації до моменту руйнування:

$$tg \sigma'' = E_{nl} = \frac{\sigma_{cm} - \sigma_y}{\Delta l_1 - \Delta l_y} \cdot l \quad (24)$$

Модуль повної деформації визначається:

$$tg \sigma' = E_{def} = \frac{\sigma_{cm}}{\Delta \partial_1} l \quad (25)$$

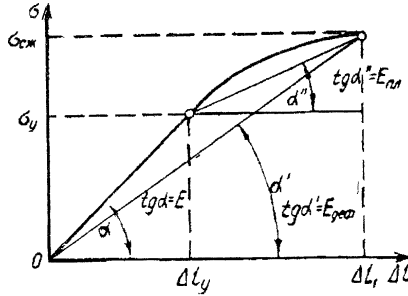


Рис. 1. Діаграма “напруження-деформація” до розрахунку модулів деформації і пластичності

При деформуванні гірських порід у них накопичується потенційна енергія. При навантаженнях, що не перевищують межу пружності, питома енергія пружної деформації дорівнює:
при одноосьовому напруженому стані

$$W_1 = \frac{\sigma^2}{2E}; \quad (26)$$

при двоосьовому (плоскому) напруженому стані

$$W_2 = \frac{\sigma_x}{2E} (\sigma_x - 2\mu \cdot \sigma_y) + \frac{\sigma_y^2}{2E}; \quad (27)$$

при трьохосьовому (об’ємному) напруженому стані

$$W_3 = \frac{1}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\mu(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x)]. \quad (28)$$

Задача №2. Зразок гірської породи висотою h і діаметром d при статичних дослідях піддавався стиску аж до руйнування при навантаженні $P_{кр}$. У процесі дослідів фіксувалися поперечні Δd і повздовжні Δh деформації, що відповідають навантаженню P при зміні його в поступовому режимі від 0 до $P_{кр}$.

Розміри зразка і розмір $P_{кр}$, вибрати відповідно до шифру з табл. 2. Розмір деформації залежно від навантаження прийняти відповідно до табл. 3.

Визначити: модуль повздовжньої пружності E на лінійній ділянці кривої навантаження; коефіцієнт Пуассона μ ; модуль зсуву G ; модуль об'ємного (всебічного) стиску K ; модуль одностороннього стиску M ; граничний січний модуль деформації (модуль пластичності) $E_{пл}$; модуль повної деформації $E_{деф}$; коефіцієнт пластичності $K_{пл}$; питому пружну енергію накопичену в зразку $W_{упр}$; питому роботу руйнування породи W .

Таблиця 2.

Варіант	0	1	3	3	4	5	6	7	8	9
Висота зразка, мм	72	71	70	68	66	64	62	60	59	58
Діаметр, мм	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28
Руйнівне навантаження $P_{кр}$, кгс	2800	2700	2600	2500	2400	2300	2200	2100	2000	1900

Таблиця 3.

Ступінь навантаження	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Зусилля стиску, частка від $P_{кр}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Абсолютна повздовжня деформація $\Delta h \cdot 10^3$, мм	0	3,5	7,0	10,5	14	17,5	21,5	25,9	31,5	40,5
Абсолютна поперечна деформація $\Delta h \cdot 10^3$, мм	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	5,2	10,3

Порядок розв'язку задачі

1. Площа поперечного перерізу зразка:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14(d \cdot 10^{-3})^2}{4}, \quad (29)$$

тут d – діаметр зразка, мм.

2. Межа міцності породи на стиск (напруження стиску, при якому відбулося руйнування):

$$\sigma_{cm} = \frac{P_{кр}}{S}, \text{ Па} \quad (30)$$

тут $P_{кр}$ – зусилля, при якому зразок зруйнувався, Н

$$P_{кр} H = P_{кр}, \text{ кгс} \cdot 9,81, \text{ м}; \quad (31)$$

S – площа поперечного перерізу, м^2 .

3. За даними таблиці розрахувати напруження стиску $\sigma_{cm} = \frac{P}{S}$,

відносні повздовжні $\varepsilon_{np} = \frac{\Delta h}{h}$ та відносні поперечні $\varepsilon_{non} = \frac{\Delta d}{d}$

деформації для кожного ступеню навантаження. Результати розрахунків занести в таблицю 4.

Таблиця 4.

Ступінь навантаження	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напруження, МПа											
Відносна повздо- вжня деформація $\varepsilon_{np} \cdot 10^4$											
Відносна попере- чна деформація, $\varepsilon_{non} \cdot 10^4$											

4. За результатами розрахунків, п.3., побудувати графік навантаження гірської породи, що відображає залежність відносних деформацій зразка від напружень. Повздовжні і поперечні деформації мають різні знаки, тому графіки їх навантаження розташовуються в різних квадратах. Точку А на графіку визначити графічно,

продовживши криву до перетину з горизонтальною лінією на рівні σ_{cm} , межі міцності, визначеного за п.2.

5. На графіку навантаження знайти точку переходу прямолінійної ділянки в криволінійну (т. В), що відповідає закінченню пружних деформацій і початку пластичних. Напруження, що відповідає т. В, є межею пружності σ_E .

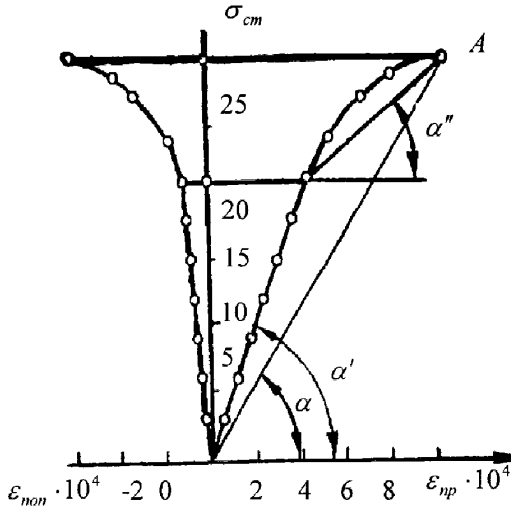


Рис. 2. Графік навантаження гірської породи

6. Модуль повздовжньої пружності визначиться як відношення напруження і відносної деформації, що відповідають т. В (можна взяти ці параметри для будь-якої точки в межах прямолінійної ділянки графіку):

$$E = \frac{\sigma_E}{\varepsilon_{np(B)}}, \text{ Па} \quad (32)$$

7. Коефіцієнт Пуассона:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{non}}{\varepsilon_{прод}}, \quad (33)$$

де $\varepsilon_{\text{ноп}}$, $\varepsilon_{\text{прод}}$ – відносні поперечні і повздовжні деформації, що можуть бути взяті в межах лінійної ділянки графіка для будь-якої точки.

8. Модуль зсуву:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \text{ Па} \quad (34)$$

де – E модуль пружності, Па;

μ – коефіцієнт Пуассона.

9. Модуль об'ємного (всебічного) стиску, Па:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (35)$$

10. Модуль одностороннього стиску, Па:

$$M = \frac{E(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (36)$$

11. Кутовий коефіцієнт прямої ОА чисельно дорівнює модулю повної деформації, що враховує пружну і пластичну деформації

$$E_{\text{деф}} = \tan \alpha = \frac{\sigma_{\text{см}}}{\varepsilon_{\text{пр}(A)}}, \text{ Па}, \quad (37)$$

де $\sigma_{\text{см}}$ – межа міцності породи, Па;

$\varepsilon_{\text{пр}(A)}$ – відносна повздовжня деформація зразка, що відповідає т. А.

12. Граничний січний модуль (модуль пластичності):

$$E_{\text{пл}} = \tan \alpha'' = \frac{\sigma_{\text{см}} - \sigma_E}{\varepsilon_{\text{пр}(A)} - \varepsilon_{\text{пр}(B)}}, \text{ Па} \quad (38)$$

де $\sigma_{\text{см}}$, σ_E – межа міцності і межа пружності породи, Па;

$\varepsilon_{\text{пр}(A)}$, $\varepsilon_{\text{пр}(B)}$ – відносні повздовжні деформації, що відповідають точкам А і В графіку.

13. Коефіцієнт пластичності:

$$K_{nl} = 2 \frac{E}{E_{def}} - 1, \quad (39)$$

де E – модуль пружності породи, Па;

E_{def} – модуль повної деформації, Па.

14. Питома пружна енергія деформації:

$$W_{np} = \frac{\sigma_E^2}{2E}, \text{ Дж/м}^3, \quad (40)$$

де σ_E – межа пружності, Па;

E – модуль пружності, Па.

15. Повна питома робота руйнування

$$W = \frac{\sigma_{cm}^2}{2E}, \text{ Дж/м}^3, \quad (41)$$

де σ_{cm} – межа міцності породи, Па;

E – межа пружності породи, Па.

6. Міцність гірських порід

Міцність – здатність гірських порід чинити опір руйнуванню.

Напруження, при якому відбувається руйнування, називається *межею міцності*. Залежно від характеру дії навантажень розрізняють межі міцності на стиск, розтяг, згин, зріз, кручення та ін.

Як правило, руйнування породи є результатом дії складного напруженого стану, коли одночасно діють різноманітні види напружень. Існує до двох десятків теорій міцності, які в деяких випадках справедливі для різноманітних матеріалів. Для гірських порід найбільше підходить теорія Мора. Вона заснована на залежності між дотичними τ і нормальними σ напругами, що одночасно діють у породі. У системі координат τ, σ ця залежність описується деякою кривою, називаною *паспортом гірської породи*, яка огинає сімейства кругів напружень, побудованих для різноманітних випадків граничного напруженого стану порід. У найпростішому випадку це пряма лінія виду

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (42)$$

де c – дотична напруження при відсутності нормальних напружень, яка називається *зчепленням*;

φ – кут внутрішнього тертя.

Тангенс кута φ називається *коефіцієнтом внутрішнього тертя*. При лінійній апроксимації огинаючої граничних кругів Мора з радіусами $R = \sigma_{cm}/2$ і $r = \sigma_p/2$, де σ_{cm} , σ_p – межі міцності на стиск і розтяг, кутовий коефіцієнт огинаючої визначається:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sigma_{cm} - \sigma_p}{2\sqrt{\sigma_{cm} \cdot \sigma_p}} \quad (43)$$

Зчеплення визначається:

$$C = \frac{\sqrt{\sigma_{cm} \cdot \sigma_p}}{2} \quad (44)$$

Розпушені породи межі міцності на розтяг не мають, а коефіцієнт внутрішнього тертя таких порід характеризує кут природного відкосу

$$\operatorname{tg} \varphi = \tau / \sigma \quad (45)$$

У загальному випадку огинаюча кругів напружень для всіх гірських порід (паспорт міцності) описується рівнянням єдиної форми

$$y = y_{\max} \left(\frac{x^2}{x^2 + a^2} \right)^{3/8}, \quad (46)$$

де $y = \tau$ – дотична напруження на площадці руйнування;

x – сума нормальних напружень при одноосьовому стиску і трьохосьовому розтязі;

a – параметр форми що огинає.

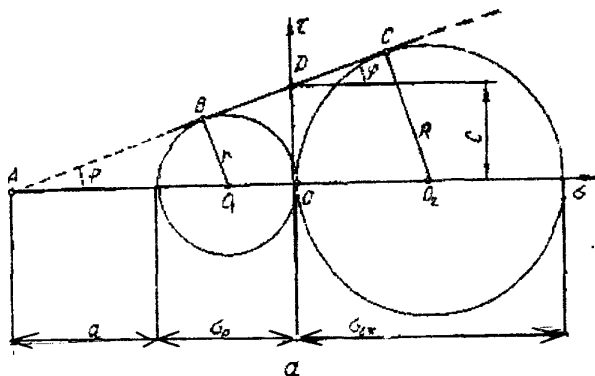


Рис.3. Лінійна огинаюча кругів Мора

Для більшості гірських порід:

$$\tau_{\max}/a = 0,73. \quad (47)$$

Задача № 3. За заданим в табл. 5 межам на одноосьовий стиск σ_{cm} і одноосьовий розтяг σ_p побудувати паспорт міцності гірської породи з лінійною апроксимацією і на основі єдиного рівняння, визначити зчеплення C , кут внутрішнього тертя φ , критичне значення дотичних напружень при заданому напруженні σ і зробити висновок про міцність породи в цьому стані.

Таблиця 5.

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Межа міцності на стиск σ_{cm} , МПа	50	55	60	65	70	80	90	100	110	120
Межа міцності на розтяг σ_p , МПа	20	18	17	15	11	9	7	5,5	5	4
Нормальне напруження σ , МПа	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280

Порядок розв'язку задачі

1. При прямолінійній апроксимації паспорту гірської породи.

1.1. Радіусами $R = \sigma_{cm}/2$ і $r = \sigma_p/2$ в обраному масштабі проводимо кола (рис. 3). При цьому коло на σ_p буде розташоване в зоні негативних, а коло на σ_{cm} – в зоні позитивних значень напружень σ .

1.2. Проводимо дотичні до цих кіл у т. В і С, що і буде паспортом міцності.

1.3. Перетин дотичної з віссю τ відітне на ній відрізок ОД, що у масштабі буде визначати розмір зчеплення C .

1.4. Кут нахилу φ дотичної до горизонталі дорівнює куту внутрішнього тертя породи.

1.5. Тангенс кута φ дорівнює коефіцієнту внутрішнього тертя.

1.6. Критичне значення дотичного напруження τ при заданому нормальному напруженні σ визначається $\tau = \sigma \tan \varphi + C$

2. Побудова паспорту міцності гірської породи за єдиним рівнянням.

Рівняння огинаючої кривої має вигляд

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{x^2}{x^2 + a^2} \right)^{3/8}, \quad (48)$$

де τ_{max} – максимальний опір породи зсуву, Па;

$x = \sigma + \sigma_{в.р.}$ – сума нормальних напружень σ при одноосьовому стиску і граничному трьохосному всебічному розтязі $\sigma_{в.р.}$, Па;

a – параметр форми кривої, Па.

2.1. Виразимо радіуси кругів Мора через параметри форми a і безрозмірні радіуси q_1 і q_2 відповідно для розтягу і стиску

$$r = \frac{\sigma_p}{2} = q_1 \cdot a_p, \text{ МПа}, \quad (49)$$

$$R = \frac{\sigma_{cm}}{2} = q_2 \cdot a_{cm}, \text{ МПа}. \quad (50)$$

Таблица 6.

$k_1 + q_1$	q_1	q_2	q_2/q_1
1,258	0,479	0,666	1,39
1,133	0,443	0,661	1,49
0,992	0,398	0,654	1,64
0,829	0,342	0,636	1,86
0,636	0,271	0,597	1,21
0,403	0,179	0,530	2,97
0,3477	0,1567	0,508	3,25
0,2880	0,1310	0,473	3,61
0,2565	0,1175	0,453	3,85
0,2218	0,1028	0,421	4,10
0,1855	0,0875	0,387	4,48
0,1446	0,0685	0,344	5,04
0,0960	0,0460	0,279	6,08
0,0848	0,0408	0,258	6,32
0,0716	0,0346	0,229	6,62
0,0646	0,0313	0,215	6,86
0,0566	0,0275	0,202	7,35
0,04841	0,0236	0,185	7,85
0,0388	0,0190	0,166	8,74
0,0267	0,0132	0,132	10,0
0,0255	0,0819	0,127	10,7
0,0223	0,0110	0,123	11,2
0,0205	0,0101	0,115	11,4
0,0185	0,0091	0,107	11,8
0,0163	0,0080	0,100	12,5
0,0141	0,0069	0,091	13,2
0,0114	0,0056	0,081	14,5
0,0080	0,0039	0,068	17,4
0,0071	0,0035	0,0634	18,3
0,0062	0,0030	0,0586	19,5
0,0057	0,0028	0,0557	19,9
0,0051	0,0025	0,0537	21,5
0,0045	0,0023	0,0500	22,7
0,0037	0,0018	0,0453	25,2
0,0026	0,0013	0,0373	29,6
0,00227	0,00113	0,0362	32,0
0,001963	0,00098	0,0329	33,6
0,001603	0,00080	0,0291	36,4
0,00113	0,00056	0,0241	43,5
0,000801	0,00040	0,0203	50,7

2.2. Безрозмірні радіуси q_1 і q_2 визначимо на основі таблиці 6, якщо відомі відношення:

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{R}{r} = \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_p}, \quad (51)$$

де σ_{cm} , σ_p межі міцності породи на стиск і розтяг відповідно до завдання.

Одночасно з таблиці 6 за приведеним вище співвідношенням q_2/q_1 виберемо значення параметра $K_1 + q_1$. Тут K_1 – безрозмірна координата центру кола трьохосного розтягу.

2.3. Обчислимо безрозмірні параметри розтягу і стиску:

$$a_p = \frac{\sigma_p}{2q_1}, \text{ МПа} \quad (52)$$

$$a_{cm} = \frac{\sigma_{cm}}{2q_2}, \text{ МПа} \quad (53)$$

2.4. Визначимо середнє значення розмірного параметру:

$$a = \frac{a_p + a_{cm}}{2}, \text{ МПа} \quad (54)$$

2.5. Обчислимо максимальний опір породи зсуву:

$$\tau_{max} = 0,73 \cdot a, \text{ МПа} \quad (55)$$

2.6. Визначимо тимчасовий опір породи всебічному рівномірному розтягу (точку перетину огинаючої кривої із віссю абсцис):

$$\sigma_{\epsilon.p.} = a(K_1 + q_1), \text{ МПа} \quad (56)$$

2.7. Визначимо розмір X – нормальне напруження щодо перетину огинаючої кривої із віссю абсцис:

$$X = \sigma_{\epsilon.p.} + \sigma, \text{ МПа}, \quad (57)$$

де σ – поточне значення нормального напруження стиску, МПа.

2.8. Задаючи параметру σ сім-десять різноманітних значень і підставляючи їх у рівняння огинаючої кривої обчислимо відповідні їм значення τ і побудуємо графічне зображення паспорту міцності, рис.4.

Величина $\tau_{\sigma=0}$, що відповідає відрітку ДО, буде визначати зчеплення C :

$$C = \tau_{\sigma=0}, \text{ МПа} \quad (58)$$

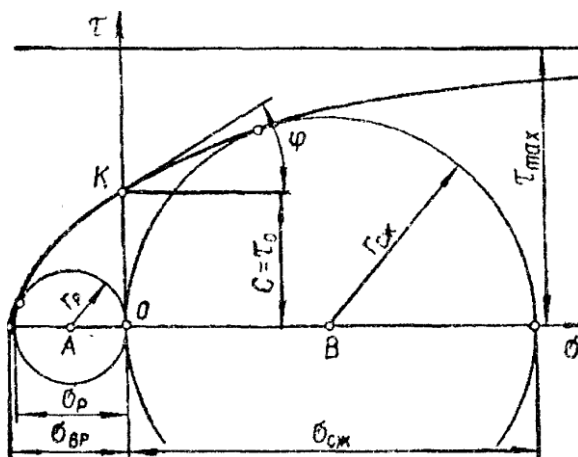


Рис. 4. Криволінійна огинаюча кругів Мора

2.9. Для визначення кута внутрішнього тертя проведемо дотичну до огинаючої кривої в т. К перетину її з віссю ординат ($\sigma=0$). Кут φ , який утворює ця дотична з горизонтальною лінією, чисельно дорівнює куту внутрішнього тертя.

3. Порівняти значення зчеплення C_l і кута тертя φ_l , які отримані в результаті лінійної апроксимації паспорту міцності із значеннями C_e і φ_e , що отримані відповідно до єдиного рівняння огинаючої кривої

$$\Delta C = \frac{C_l - C_e}{C_e} \cdot 100\%, \quad (59)$$

$$\Delta \varphi = \frac{\varphi_l - \varphi_e}{\varphi_e} \cdot 100\%. \quad (60)$$

За результатами порівняння зробити висновок на основі ступеню збіжності результатів про можливість використання спрощеного методу побудови паспорту міцності породи по лінійній апроксимації.

7. Побудова можливої поверхні зсуву уступу за допомогою методу Г.Л. Фісенко

Задача №4. Побудувати можливу поверхню зсуву уступу висотою H і кутом α . Порода, якою складено уступ має наступні характеристики:

- кут внутрішнього тертя ρ , град;
- зчеплення k , т/м²;
- питома вага γ , т/м³.

Вихідні дані наведені в табл. 7.

Таблиця 7

№ варіан- ту	Вихідні дані				
	Висота уступу, м	Кут нахилу уступу, град.	Кут внутрішнього тертя породи, град.	Зчеплення породи, т/м ²	Питома вага породи, т/м ³
1	2	3	4	5	6
1	20	40	15	1,2	1,6
2	21	41	20	1,3	1,7
3	22	42	25	1,4	1,8
4	23	43	30	1,5	1,9
5	24	44	35	1,2	1,6
6	25	45	15	1,3	1,7
7	26	40	20	1,4	1,8
8	27	41	25	1,5	1,9
9	28	42	30	1,2	1,6
10	29	43	35	1,3	1,7
11	30	44	15	1,4	1,8
12	20	45	20	1,5	1,9
13	21	40	25	1,2	1,6
14	22	41	30	1,3	1,7
15	23	42	35	1,4	1,8
16	24	43	15	1,5	1,9
17	25	44	20	1,2	1,6
18	26	45	25	1,3	1,7
19	27	40	30	1,4	1,8
20	28	41	35	1,5	1,9
21	29	42	15	1,2	1,6

Продовження табл. 7

1	2	3	4	5	6
22	30	43	20	1,3	1,7
23	20	44	25	1,4	1,8
24	21	45	30	1,5	1,9
25	22	40	35	1,2	1,6
26	23	41	15	1,3	1,7
27	24	42	20	1,4	1,8
28	25	43	25	1,5	1,9
29	26	44	30	1,2	1,6
30	27	45	35	1,3	1,7

Розв'язання:

1. Визначаємо висоту вертикального оголення породи H_{90} :

$$H_{90} = \frac{2 \cdot k}{\gamma} \operatorname{ctg}(45^\circ - \frac{\rho}{2}), \text{ м}, \quad (61)$$

де k – зчеплення породи, т/м²;

γ – питома вага породи, т/м³;

ρ – кут внутрішнього тертя породи, град.

2. Будуємо відкос уступу з кутом нахилу α і проводимо побудову поверхні зсуву за наступним алгоритмом (рис. 5):

➤ Будуємо уступ висотою H і кутом відкосу α .

➤ Відкладаємо висоту вертикального оголення породи H_{90} – пряма a .

➤ Вибираємо довільну точку D на прямій a .

➤ З точок B і D відкладаємо відповідно кути β_1 і β_2 які рівні між собою і дорівнюють:

$$\beta_1 = \beta_2 = 45^\circ + \frac{\rho}{2}, \text{ град} \quad (62)$$

Точка M – точка перетину прямих BM і DM .

➤ З точки C (нижня бровка уступу) відкладаємо кут β_3 , який дорівнює:

$$\beta_3 = 45^\circ - \frac{\rho}{2}, \text{ град} \quad (63)$$

➤ На продовженні прямої DM вибираємо рівні відрізки MK і KL , тобто $MK = KL$.

➤ Через точки K і L проводимо прямі KN і LG паралельно прямій BM , тобто $BM \parallel KN \parallel LG$. Точки N і G – перетин KN і LG з прямою AC відповідно.

➤ На прямій CQ відкладаємо відрізки CF і FE , які рівні між собою, тобто $CF = FE = MK = KL$.

➤ Через точки F і E проводимо прямі FT і EP , які паралельні прямій AC , тобто $FT \parallel EP \parallel AC$. Точки T і P лежать на верхній площадці уступу.

➤ Перетин прямих KN і FT дає точку Н. Перетин прямих LG і EP дає точку Х. Через дані точки проводимо пряму НХ.

➤ Продовження прямої НХ і CQ дають в перетині точку S.

➤ Через точку S проводимо пряму паралельно прямій DM. Перетин даної прямої з прямою BM дає точку Y.

➤ Продовжуючи пряму SY до перетину з прямою *a* отримаємо точку Z.

➤ Прямі CS і SY є дотичними до кола і перпендикулярні CO і YO є радіусами кола ($CO = YO = R_k$) з центром у точці О.

➤ За допомогою циркуля будуємо частину кола з точки С до точки Y.

➤ З точки Z проводимо вертикально перпендикуляр WZ до перетину з верхньою площадкою уступу.

Таким чином ми отримали можливу поверхню зсуву, яка на рисунку має вигляд кривої CYZW, що має CY – частину кола, відрізки YZ і ZW – прямі.

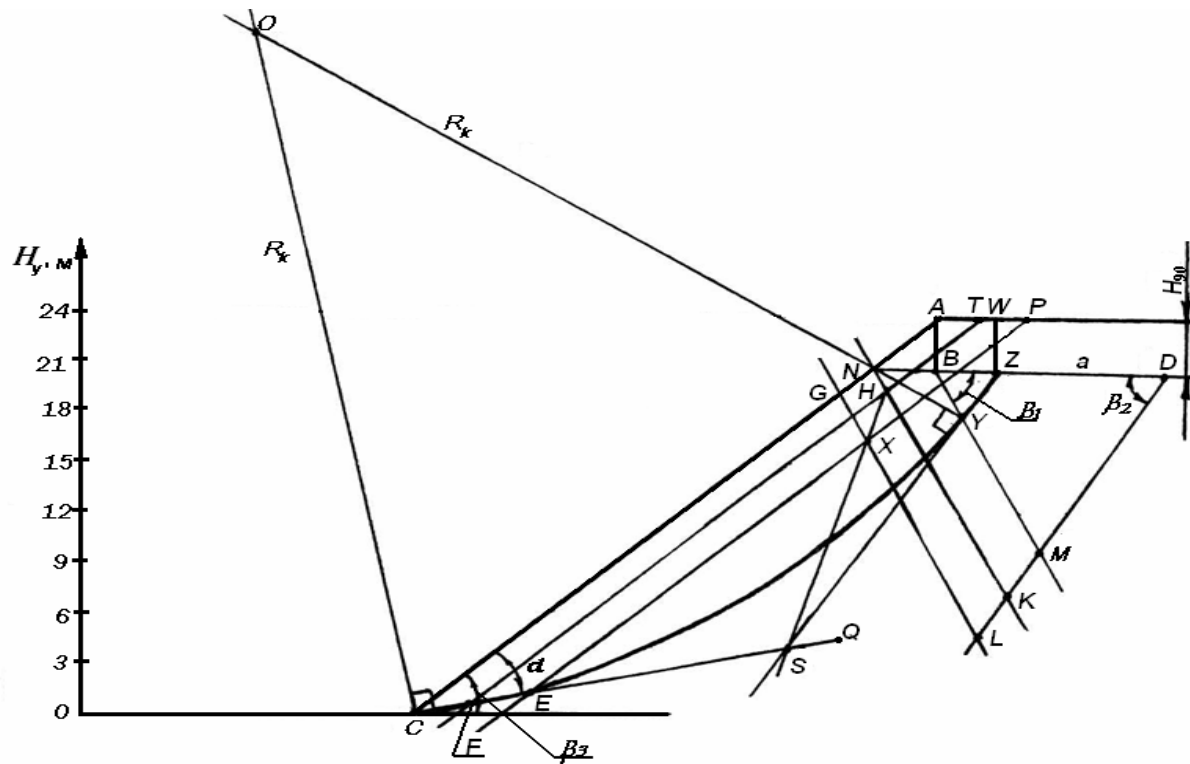


Рис. 5. Побудова можливої поверхні зсуву уступу

8. Побудова стійкого відкосу увігнутого профілю методом В.В. Соколовського

Задача №5. Побудувати стійкий відкос увігнутого профілю за наступними даними:

- кут внутрішнього тертя ρ , град;
- зчеплення k , т/м²;
- питома вага γ , т/м³;
- висота уступу H_y , м.

Вихідні дані наведені в табл. 7. (Задача №4).

Розв'язання:

1. Визначаємо висоту вертикального оголення породи H_{90} (розраховано в задачі №4).

2. Будуємо верхню і нижню площадку уступу (рис. 7). Точка А – верхня бровка уступу.

3. З точки А опускаємо перпендикуляр АС, який чисельно рівний висоті вертикального оголення породи H_{90} .

4. З точки С опускаємо перпендикуляр донизу, який і буде віссю Y . З точки С проводимо перпендикуляр до відрізка АС. Даний перпендикуляр є віссю - X . Точка С співпадає з початком координат – з точкою О.

У такий спосіб ми отримали систему координат - XOY . В даній системі $Y_{\max} = H - H_{90}$.

5. Для побудови стійкого відкосу уступу увігнутої форми переходимо до безрозмірних координат через формули:

$$\bar{y} = \frac{\gamma}{k} \cdot y \quad (64);$$

$$x = \frac{k}{\gamma} \cdot \bar{x} \quad (65)$$

Також для побудови увігнутого профілю використовуємо графік (рис. 6).

6. Для побудови профілю необхідно декілька точок. Для знаходження цих точок використовуємо наступний алгоритм:

- вибираємо значення y ($y = H - H_{90}$) і заносимо в таблицю 8 у першу графу (стовпчик);
- визначаємо безрозмірну координату $\bar{y}$ за формулою (64);
- за графіком знаходимо відповідне значення $\bar{x}$;
- за формулою (65) знаходимо значення x .

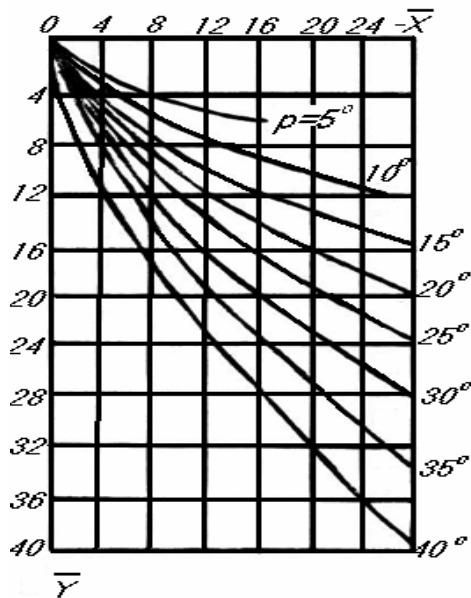


Рис. 6. Графік граничних обрисів рівностійкого відкосу увігнутого профілю

Таблиця 8

y	$\bar{y}$	$\bar{x}$	x
21			
18			
15			
12			
9			
6			
3			

7. По точках будемо увігнутий профіль, який представлений на рис. 7.

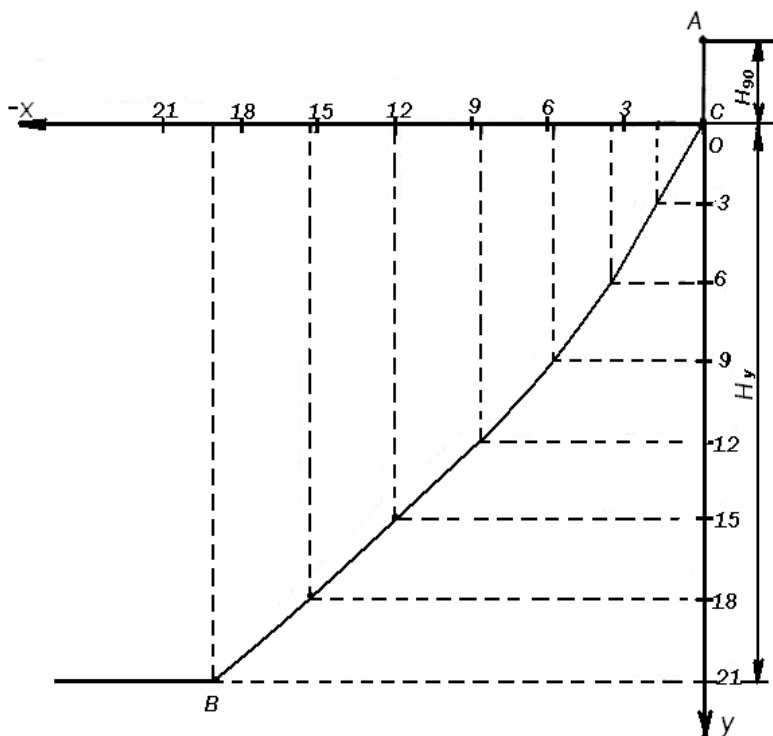


Рис. 7. Побудова увігнутого профілю відкосу уступу

9. Побудова відкосу уступу випуклого та плоского профілю.

Задача №6. Побудувати відкос уступу випуклого та плоского профілю за наступними даними:

- кут внутрішнього тертя ρ , град;
- зчеплення k , т/м²;
- питома вага γ , т/м³;
- висота уступу H_y , м.

Вихідні дані наведені в табл. 7. (Задача №4).

Розв'язання:

1. Визначаємо висоту вертикального оголення породи H_{90} (розраховано в задачі №4).
2. Визначаємо приведену висоту уступу:

$$H' = \frac{H_y}{H_{90}}, \text{ м} \quad (66)$$

3. По таблиці 9 для побудови випуклого профілю знаходимо величину приведенного закладення L' при заданому куті внутрішнього тертя ρ .

Таблиця 9

Умовна висота відкосу H' , м	Закладення відкосу L' випуклого борта при кутах внутрішнього тертя ρ , м						
	5	10	15	20	25	30	35
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0,57	0,50	0,46	0,40	0,35	0,33	0,27
2,0	1,37	1,20	1,05	0,93	0,85	0,75	0,64
2,5	2,37	2,03	1,80	1,55	1,35	1,22	1,05
3,0	3,85	3,02	2,60	2,25	1,95	1,72	1,45
3,5	6,00	4,17	3,50	2,95	2,55	2,25	1,92
4,0	8,70	5,50	4,50	3,75	3,20	2,77	2,40
4,5	11,75	7,10	5,57	4,50	3,90	3,35	2,90
5,0	15,00	8,75	6,70	5,40	4,60	3,95	3,40
6,0	-	12,30	9,15	7,30	6,05	5,20	4,45
7,0	-	15,90	11,75	9,20	7,60	6,45	5,50
8,0	-	19,50	14,45	11,25	9,15	7,75	6,60
9,0	-	23,00	17,20	13,30	10,80	9,15	7,70
10	-	-	20,05	15,40	12,45	10,55	8,90
11	-	-	23,00	17,55	14,20	11,90	10,05
12	-	-	25,90	19,80	15,95	13,25	11,25
13	-	-	-	22,10	17,70	14,65	12,45
14	-	-	-	24,30	19,50	16,10	13,65
15	-	-	-	26,60	21,35	17,50	14,65
16	-	-	-	-	23,20	18,95	16,05
17	-	-	-	-	25,00	20,40	17,25
18	-	-	-	-	-	21,85	18,46
19	-	-	-	-	-	23,35	19,65
20	-	-	-	-	-	24,80	20,85

4. Дійсні значення закладення знаходимо за формулою:

$$L = L' \cdot H_{90} \quad (67)$$

5. Значенню приведенної висоти уступу H' відповідає висота уступу H і якому відповідає дійсне значення закладення L . Таким чином ми отримали точку з координатами H і L . Дана точка (т. А) є верхньою

бровкою уступу.

6. Знаходимо декілька проміжних значень H і L і заносимо їх до табл.10.

Таблиця 10

$H, м$	H'	L'	L
24			
21			
18			
15			
12			
9			
6			

7. За даним, точкам H і L будуємо відкос випуклої форми в системі координат НОЛ (рис. 8).

8. За значеннями кута внутрішнього тертя ρ і умовної висоти уступу H' по табл. 11 для побудови плоского профілю відкосу уступу знаходимо кут укосу плоскої форми β .

Таблиця 11

Умовна висота відкосу $H', м$	Кут нахилу плоского борта (в градусах) при куті внутрішнього тертя ρ							
	0	5	10	15	20	25	30	35
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,0	90	90	90	90	90	90	90	90
1,5	80,7	81,4	82,3	83,0	83,0	84,0	84,5	85,0
2,0	69,2	71,3	73,0	74,6	75,8	77,3	78,1	79,6
2,5	53,0	60,0	63,5	65,5	68,2	71,0	72,5	74,4
3,0	-	47,3	53,7	58,0	61,8	65,2	68,0	70,2
3,5	-	37,0	46,1	51,0	56,3	60,2	64,0	66,5
4,0	-	28,0	39,5	45,8	51,3	56,0	60,1	63,6
4,5	-	22,3	34,6	41,6	47,2	52,5	56,9	60,9
5,0	-	18,0	30,8	38,0	44,0	49,6	53,6	58,5
5,5	-	14,7	27,8	35,0	41,4	47,0	51,7	56,6
6,0	-	12,0	26,8	32,7	39,1	45,0	50,0	54,8
6,5	-	10,0	24,0	30,9	37,3	43,4	48,5	53,4
7,0	-	8,0	22,5	29,4	36,8	41,9	47,1	52,2
8,0	-	-	20,1	27,2	33,6	39,6	45,2	50,2
9,0	-	-	18,4	25,6	31,7	38,0	43,9	48,6
10	-	-	17,1	24,2	30,3	36,7	42,6	47,4

Продовження табл. 11

1	2	3	4	5	6	7	8	9
11	-	-	16,4	23,4	29,7	36,7	41,6	46,4
12	-	-	15,8	22,7	29,0	36,0	40,7	45,6
14	-	-	14,6	21,4	27,9	34,0	39,2	44,3
16	-	-	14,2	20,8				
18	-	-	-	19,8	26,8	33,0	38,3	43,0
20	-	-	-	19,2	26,2	32,3	37,7	42,7
24	-	-	-	-	25,5	31,7	37,1	42,1
28	-	-	-	-	24,7	30,3	36,5	40,9
30	-	-	-	-	-	29,7	35,7	40,3

9. Знаходимо результуючий кут відкосу α випуклої форми. З'єднуємо лінією точки А і О.

10. Виконуємо спрямлення випуклого профілю. Для цього уступ по висоті ділимо на три рівні відрізки (прямі a і b). Пряма a перетинає випуклий профіль в точці В, а результуючий кут α в точці С. Визначаємо середину відрізка ВС – точка D. Сполучаємо початок координат з точкою D. З точки D проводимо пряму під кутом α до прямої b і одержуємо в перетині точку К. Далі з'єднаємо точку К з верхньою бровкою уступу (т. А). Отже лінія ОДКА є лінією спрямлення випуклого профілю відкосу уступу.

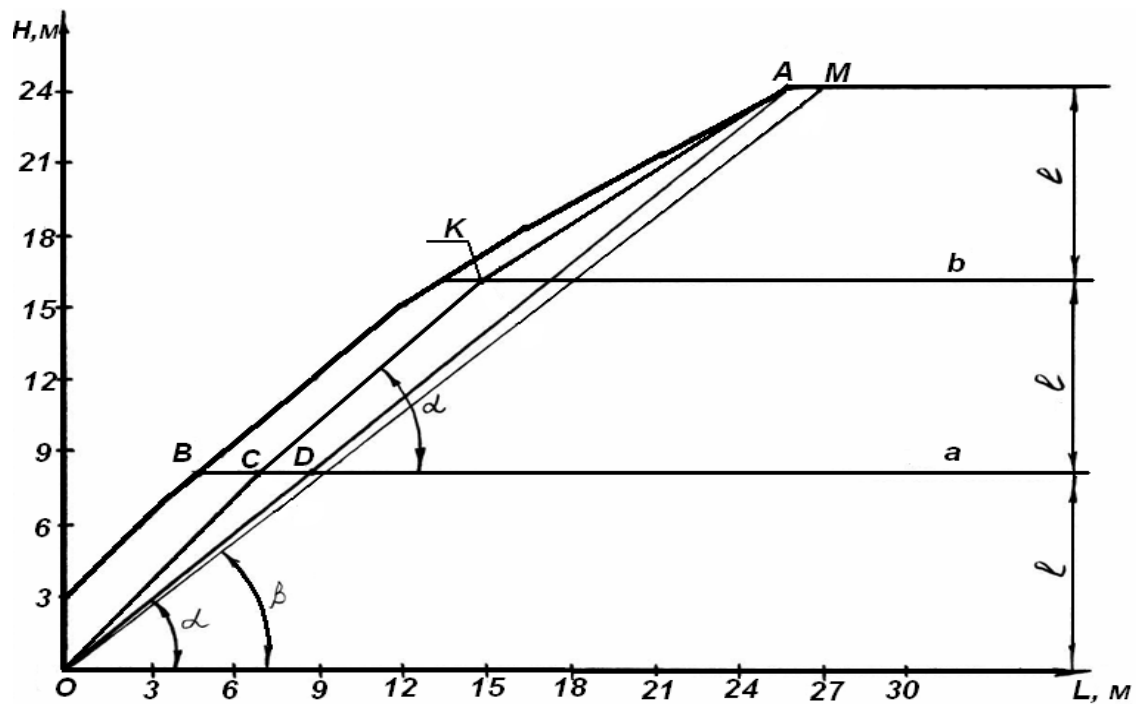


Рис. 8. Побудова випуклого та плоского профілю відкосу уступу

10. Розрахунок стійкості багатоярусного відвалу

Задача №7. Розрахувати стійкість багатоярусного відвалу та побудувати його профіль за наступними даними:

- кут внутрішнього тертя породи ρ , град;
- зчеплення породи κ , т/м²;
- питома вага породи γ ; т/м³;
- кут природного відкосу α , град;
- висота відвалу H , м.

Вихідні дані наведені в табл. 12.

Таблиця 12

№ варіанту	Вихідні дані				
	Висота відвалу, м	Кут природного відкосу, град.	Кут внутрішнього тертя породи, град.	Зчеплення породи, т/м ²	Питома вага породи, т/м ³
1	2	3	4	5	6
1	40	35	15	1,2	1,6
2	45	36	20	1,3	1,7
3	50	37	25	1,4	1,8
4	40	38	30	1,5	1,9
5	45	39	35	1,2	1,6
6	50	40	15	1,3	1,7
7	40	41	20	1,4	1,8
8	45	42	25	1,5	1,9
9	50	43	30	1,2	1,6
10	40	44	35	1,3	1,7
11	45	45	15	1,4	1,8
12	50	35	20	1,5	1,9
13	40	36	25	1,2	1,6
14	45	37	30	1,3	1,7
15	50	38	35	1,4	1,8
16	40	39	15	1,5	1,9
17	45	40	20	1,2	1,6
18	50	41	25	1,3	1,7
19	40	42	30	1,4	1,8
20	45	43	35	1,5	1,9
21	50	44	15	1,2	1,6
22	40	45	20	1,3	1,7
23	45	35	25	1,4	1,8
24	50	36	30	1,5	1,9
25	40	37	35	1,2	1,6
26	45	38	15	1,3	1,7

Продовження табл. 12

1	2	3	4	5	6
27	50	39	20	1,4	1,8
28	40	40	25	1,5	1,9
29	45	41	30	1,2	1,6
30	50	42	35	1,3	1,7

Розв'язання

1. За графіком (рис. 9) знаючи кут внутрішнього тертя ρ та кут природного відкосу α знаходимо граничну висоту H' в безрозмірних координатах.

2. Визначаємо розрахункову граничну висоту ярусу відвалу:

$$h_{я} = H' \cdot \frac{k}{\gamma}, \text{ м}, \quad (68)$$

де H' – безрозмірна гранична висота;

k - зчеплення породи k , т/м²;

γ – питома вага породи; т/м³.

Так, як $H > h_{я}$, то необхідно застосувати багатоярусне відвалоутворення.

3. Знаходимо кількість ярусів:

$$n_{я} = \frac{H}{h_{я}}, \quad (69)$$

де H – висота відвалу, м.

4. Визначаємо результуючу граничну висоту в безрозмірних координатах:

$$H_{зр} = H \cdot \frac{k}{\gamma} \quad (70)$$

5. Знаючи кут внутрішнього тертя ρ і граничну висоту $H'_{зр}$ за графіком знаходимо результуючий кут укосу α_p .

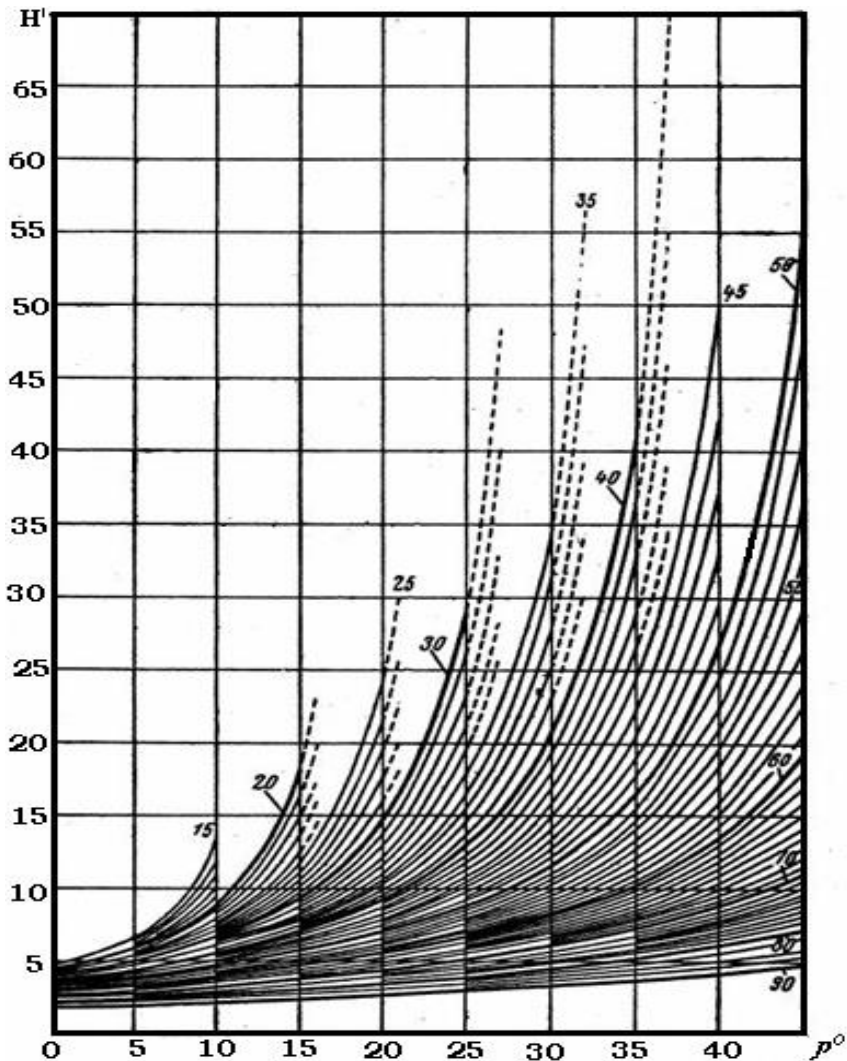


Рис. 9. Графік для розрахунку прямолінійних відкосів
(пунктиром дані криві, що побудовані за екстраполяційними даними)

6. Профіль багатоярусного відвалу будують наступним чином:
– з точки F (нижня бровка) під кутом α_p проводимо пряму FA
(точка A – верхня бровка);

- ділимо висоту відвалу на кількість ярусів n_j з висотами, сума яких повинна дорівнювати H і висота кожного ярусу не повинна перевищувати h_n ;
 - з точок A та F під кутом природного укосу α проводимо прямі на висоти відповідних ярусів і отримуємо точки B і E відповідно;
 - з точок B і E проводимо горизонтальні прямі, які перетинаються з прямою AF в точках G і H .
 - з точки O , яка знаходиться на середині відрізка H проводимо пряму під кутом природного відкосу α до перетину з попередньо нанесеними горизонтальними прямими в точках C і D .
- У такий спосіб отримали контур $ABCDEF$ багатоярусного відвалу.

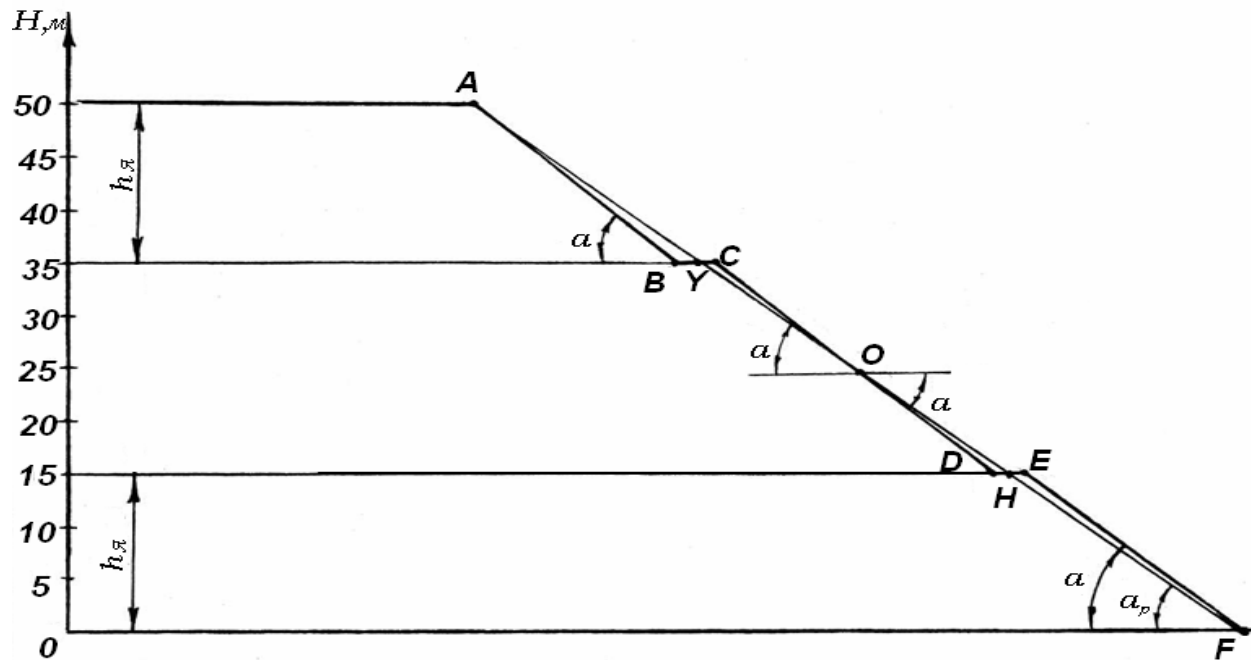


Рис. 10. Профіль багатоярусного відвалу

11. Вимоги до виконання та оформлення розрахунково-графічної роботи

Розрахунково-графічна робота “Стійкість бортів кар’єрів” виконується згідно з індивідуальним варіантом, який відповідає номеру по списку студента в академічній групі. Індивідуальні варіанти завдань наведено в кожному розділі задач методики.

Розрахунково-графічна робота оформляється на аркушах формату А4. До пояснювальної записки входять: титульний аркуш (додаток 1); зміст (додаток 2); розрахункова частина; висновки; використана література.

12. Критерії оцінювання розрахунково-графічної роботи

Виконана розрахунково-графічна робота захищається особисто викладачу.

Оцінювання здійснюється за бальною системою:

90-100 балів (“А”, “відмінно”) – якщо розрахунково-графічна робота виконана вірно згідно індивідуального варіанту (вірно виконані усі 8 задач), і під час захисту були надані вірні і повні відповіді на поставлені питання;

81-89 балів (“В”, “добре”) – якщо розрахунково-графічна робота виконана згідно індивідуального варіанту із незначними помилками, які суттєво не вплинули на кінцевий результат. Або під час захисту були незначні помилки у відповідях на поставлені питання;

70-80 балів (“С”, “добре”) – якщо розрахунково-графічна робота виконана згідно індивідуального завдання у більшості своїй з незначними помилками, які суттєво не вплинули на кінцевий результат, а суттєві помилки присутні не більше як у трьох задачах. Та під час захисту були незначні помилки у відповідях на поставлені питання;

69-70 балів (“D”, “задовільно”) – якщо розрахунково-графічна робота виконана згідно індивідуального варіанту із суттєвими помилками, які зустрічаються не більше ніж у чотирьох задачах. Або під час захисту не було подано правильних відповідей щонайменше на 50% поставлених питань, чи відповіді неточними і неповними;

50-60 балів (“Е”, “задовільно”) – якщо розрахунково-графічна робота виконана згідно індивідуального варіанту із суттєвими помилками, які зустрічаються більше ніж в чотирьох задачах. Або під час захисту не було подано правильних відповідей більше 50% від усіх поставлених питань, чи відповіді неточними і неповними.

26-49 балів (“FX”, “незадовільно з обов’язковим перескладанням окремих модулів”) – якщо розрахунково-графічна робота виконана не вірно, чи не за своїм індивідуальним варіантом. Або під час захисту не було надано жодної відповіді на поставлені питання, чи відповіді були не вірними;

0-25 балів (“F”, “незадовільно з обов’язковим перескладанням повного курсу”) – якщо розрахунково-графічна робота не була виконана або виконана менше ніж на 25% відсотків правильно.

Список рекомендованої літератури

1. *Алексеев С.Ф., Мележик В.П.* Физика гірських порід. Гірський тиск. – К.: Вища шк. Головне вид-во, 1987.
2. *Алексеев С.Ф., Мележик В.П.* Физика гірських порід. Гірський тиск. Збірник задач і вправ. К.: Вища шк. Головне вид-во, 1988.
3. *Барон Л.И.* Свойства гірських порід при різних видах і режимах нагруження. – М.: Надра, 1983.
4. Гірська справа: термінологічний словник. М.: Надра, 1981.
5. *Новик Г.Я., Кузьяев Л.С.* Сборник задач і вправ по фізиці гірських порід. – М.: МГИ, 1984.
6. *Орлов В.В., Гудзь А.Г.* Збірник прикладів і задач по механіці гірських порід і кріпи. – М.: Госгортехіздат, 1961.
7. *Ржевский В.В., Новик Г.Я.* Основы фізики гірських порід. – М.: Надра, 1984.
8. Фізичні властивості гірських порід і корисних копалин /Під. ред. *Н.Б. Дортмана.* – М.: Надра, 1986.
9. *Ямщиков В.С.* Методи і засоби дослідження і контролю гірських порід і процесів. М.: Надра, 1982
10. *Музыка І.А., Кальчук С.В., Остафійчук Н.М.* Методичні вказівки до вивчення предмету «Керування стійкістю відвалів та бортів кар'єру – :Житомир: ЖДТУ, 2008.

Зміст

Передмова.....	3
1. Коротка характеристика факторів, які впливають на стійкість відкосів кар'єрів.....	4
2. Основні поняття і терміни.....	4
3. Мінерали і гірські породи. Основні поняття.....	6
4. Фізико-технічні властивості гірських порід.....	8
5. Механічні властивості гірських порід.....	12
6. Міцність гірських порід.....	20
7. Побудова можливої поверхні зсуву уступу за допомогою методу Г.Л. Фісенко.....	27
8. Побудова стійкого відкосу увігнутого профілю методом В.В. Соколовського.....	31
10. Побудова відкосу уступу випуклого та плоского профілю.....	33
11. Розрахунок стійкості багатоярусного відвалу.....	38
12. Вимоги до виконання та оформлення розрахунково-графічної роботи.....	43
13. Критерії оцінювання розрахунково-графічної роботи.....	43
Список рекомендованої літератури.....	45

Кальчук Сергій Володимирович
Остафійчук Неля Миколаївна

Стійкість бортів кар'єрів

*Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи
“Стійкість бортів кар'єрів” для студентів спеціальності
7.050301 “Маркшейдерська справа”*

Рецензент: Назаренко В.О.
Соболевський Р.В.

Здано в набір _____. Підписано до друку _____. Формат 30×42/4.
Гарнітура Times New Roman. Папір офісний. Друк ризографія.
Умов. друк. арк. _____. Обл. вид. арк. _____. Наклад 200 прим. Зам. № ____.

Віддруковано з оригіналу в редакційно-видавничому відділі
Житомирського державного технологічного університету
10005, Житомир, вул. Черняхівського, 103