

І.В. Іорданов
Ю.І. Сімонова
А.В. Петренко
А.В. Король
Є.С. Подкопасьв
О.П. Каюн
О.І. Єфремов

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКЛАДНИХ МАСИВІВ

Мета роботи. Дослідження фізико-механічних характеристик закладних масивів, призначених для підтримання бічних порід у вуглепородному масиві, що вміщує виробки.

Методи. Для досягнення поставленої мети були виконані експерименти на зразках із породи різного гранулометричного складу, які піддавалися компресійному стисненню.

Результати. В результаті виконаних досліджень визначені фізико-механічні характеристики закладних масивів із породи різного гранулометричного складу. Встановлено, що зміна пустотності закладних масивів при компресійному стисненні, в цілому залежить від величини вертикальних нормальних напружень та розміру фракції породи, їх процентного співвідношення в загальному обсязі. При вертикальних відносних деформаціях, коли розширення закладного масиву в сторони неможливе, зменшення кубатури відбувається за рахунок перепакування частинок породи при незмінному обсязі твердої частини. При цьому, чим неоднорідна порода, тим ефективніше процес перепакування. В умовах одновимірної задачі, питома робота при стисканні, що витрачається на деформування одиниці об'єму закладного масиву, збільшується в міру зменшення насипної щільності дробленої породи, коли коефіцієнт ущільнення приймає максимальні значення. Чим більше робота деформації, тим більше модуль стиснення закладного масиву. Напружено-деформований стан закладних масивів, визначається величиною стискаючої сили, насипної щільності породи і компресійного модуля деформації.

Новизна. Доведено, що при компресійному стисненні закладних масивів із породи, значення модуля деформації змінюються по параболічній залежності і обумовлюються гранулометричним складом вихідного матеріалу. При наявності у вихідному закладному матеріалі неоднорідних фракцій породи, значення компресійного модуля приймають мінімальні значення і збільшуються, по мірі зміни насипної щільності. Причому, чим менше фракція породи, тим більше її насипна щільність і значення компресійного модуля деформації закладного масиву.

Практична значимість. Для підтримання магістральних або дільничних виробок при способі управління покрівлею закладкою виробленого простору, необхідно забезпечити неоднорідність гранулометричного складу використовуваної породи. Дотримання цієї вимоги, забезпечить максимальне стиснення закладного масиву і плавний прогин бічних порід у виробленому просторі, при розвантаженні вуглепородного масиву, що вміщує виробки.

Ключові слова: вуглепородний масив, насипна щільність, компресійне стиснення, гранулометричний склад, деформація, навантаження, спосіб охорони, гірничий тиск

Вступ.

В даний час, розробка вугільних пластів Донбасу, характеризується відносно низьким рівнем техніко-економічних показників. Неабиякою мірою це пов'язано з відсутністю надійних способів забезпечення стійкості бічних порід і експлуатаційного стану гірничих виробок. Досвід роботи шахт показує, що з ростом глибини розробки, гірничо-геологічні умови ускладнюються, а стійкість бокових порід погіршується. Це призводить до такого стану, при якому гірничі виробки, особливо виїмкові штреки, в 60% випадків, виявляються в незадовільному стані. Використовувані в даний час способи охорони дільничних підготовчих виробок різними конструкціями

з дерева або ціликами вугілля, не забезпечують надійний захист штреків від небезпечних проявів гірничого тиску. Цілком видно, при вирішенні складних питань управління геомеханічними процесами, з точки зору забезпечення стійкості бічних порід, суттєво змінити геомеханічну обстановку в вуглепородному масиві, що вміщує виробки, можна за рахунок застосування закладки виробленого простору. Це дозволить створити умови для збереження стійкості бічних порід позаду очисного вибою і експлуатаційного стану виїмкових штреків, тобто виключити завали гірничих виробок і підвищити безпеку праці гірників в підземних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Світовий досвід роботи вугільних шахт показує, що з ростом глибини гірничих робіт, у вуглепородному масиві, що вміщує виробки, починає проявлятися розшарування бічних порід. В залежності від гірничо-геологічних умов, при традиційних способах управління покрівлею (повне обвалення покрівлі), подріблюванні і розшарованні породи являють собою блоковий масив, який неконтрольовано осідає позаду очисного вибою. Раптовість виникнення таких ситуацій зростає при відсутності у виробленому просторі (позаду очисного вибою) підтримуючих опор. Такий стан сприяє прояву динамічних навантажень на кріплення гірничих виробок і завалу штреків [1-5].

Відомо [6-8], що найбільш сприятливий вплив на стан бічних порід і гірничих виробок, надає спосіб управління покрівлею закладкою виробленого простору. При використанні цього способу виключаються обвалення бічних порід і завали дільничних підготовчих виробок. Закладний масив запобігає розвитку інтенсивного тріщиноутворення в області підтримання гірничих виробок і створює зони стійких порід у виробленому просторі [8].

Володіючи певними фізико-механічними властивостями, закладні масиви із породи, виконують роль охоронних споруд і обмежують зміщення бічних порід у вуглепородному масиві. Тому, застосування закладки виробленого простору позитивно впливає на стан бічних порід і, особливо покрівлі, яка є основним грузонесучим елементом підземної споруди.

Постановка задачі дослідження.

Визначити фізико-механічні характеристики закладних масивів із породи різного гранулометричного складу, що дозволить обґрунтувати стійкість бокових порід та гірничих виробок на виїмковій дільниці при розробці вугільних пластів.

Матеріали і результати досліджень.

Оцінюючи деформаційні властивості зразків із породи різного гранулометричного складу, в цьому дослідженні визначаються фізико-механічні характеристики закладних масивів при компресійному стискуванні. Компресійні випробування, є зручним інструментом моделювання поведінки закладних масивів під навантаженням.

Відомо [3, 6, 8], що закладні масиви складаються із породи різного гранулометричного складу, а значить, їх фізико-механічні характеристики залежать від співвідношення фракцій вихідного матеріалу в загальному об'ємі подрібленої породи, яка використовується для закладки виробленого простору.

Для визначення гранулометричного складу породи, в дослідженні проводився аналіз крупності вихідного закладного матеріалу ситовим методом [9]. Попередньо висушений вихідний матеріал розсипали на горизонтальний поверхні рівним шаром. Товщина шару відповідала 3 мм. Потім цей шар поділяли на квадрати 3-4 мм. З кожного квадрата відбирали породу з таким розрахунком, щоб її вага становила 200 гр. Після відбору проб, вихідний матеріал просіювали через набір стандартних сит. Дані лабораторних досліджень представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Дані ситового аналізу породи для експериментальних зразків

Розмір фракції, мм	% вмісту в загальному обсязі
>5	4
4-5	16
3-4	19
2-3	24
1-2	18
0.1-1	14
<0.1	5

Одними з основних властивостей фізико-механічних характеристик закладних масивів є насипна щільність $\rho_{н.щ}$ (кг/м³) вихідного матеріалу і пустотність M (%), яка

залежить від ступеня подрібнення породи, поміщеної в певний об'єм.

При проведенні досліджень, величину насипної щільності $\rho_{н.щ}$ (кг/м³) визначали

відповідно до методики [9]. Для цього використовували лабораторні проби, висушені до постійної маси. Дані лабораторних досліджень представлені в табл. 2.

Відомо [15], що величина пустотности залежить від гранулометричного складу і представляє собою відношення об'єму пористості між частинками роздробленої

породи до всього об'єму, що займається масою вихідного матеріалу. Пустотність M (%) породи визначалася розрахунковим шляхом, з урахуванням значень щільності ρ (кг/м³) вихідного матеріалу і його насипної щільності $\rho_{н.щ}$ (кг/м³), за методикою [9].

Дані, лабораторних досліджень, представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Дані лабораторних досліджень за визначенням насипної щільності $\rho_{н.щ}$ (кг / м³) і пустотности M (%) породи

Розмір фракції, мм	$\rho_{н.щ}$ (кг/м ³)	M (%)
0,1-5	1820	14
4-5	1680	20
3-4	1720	19
2-3	1860	12
1-2	1880	11
0,1-1	1940	8

Визначення основних показників стиснення породи, вироблялося шляхом ущільнення вихідного матеріалу в сталевому циліндрі, без можливості бокового розширення.

Випробування експериментальних зразків із породи різного гранулометричного складу проводилися в компресійному приладі. Основною його частиною є циліндрична обойма з жорсткими стінками. Навантаження, на вміщену в обойму породу, прикладалася через плунжер (рис. 1). При стисненні зразок породи дає на стінки сталевому циліндра горизонтальний тиск. Вертикальний нормальний тиск відповідає інтенсивності прикладеної стискаючої сили.

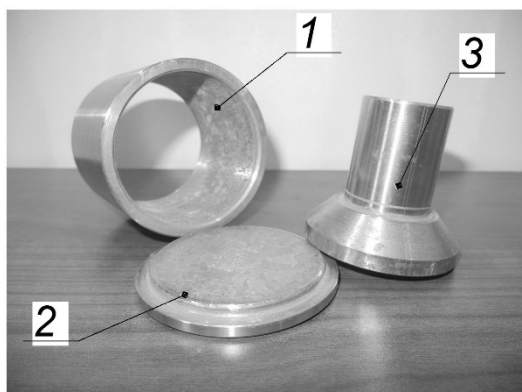


Рис. 1. Компресійний прилад, що складається з сталевого циліндра (1), знімного дна (2) і плунжера (3)

Досліди виконувались наступним образом. Експериментальний зразок із породи певного гранулометричного складу,

встановлювали між плитами преса ГП-50 (рис. 2). Зверху, до зразка прикладалося навантаження. При збільшенні навантаження, висота експериментального зразка зменшувалася, а це означає, що порода в сталевому циліндрі ущільнювалася.

Число випробувань $n = 10$, необхідне для отримання достатніх результатів експерименту, з показником точності $\varepsilon = 5\%$, було встановлено відповідно до [10,11].

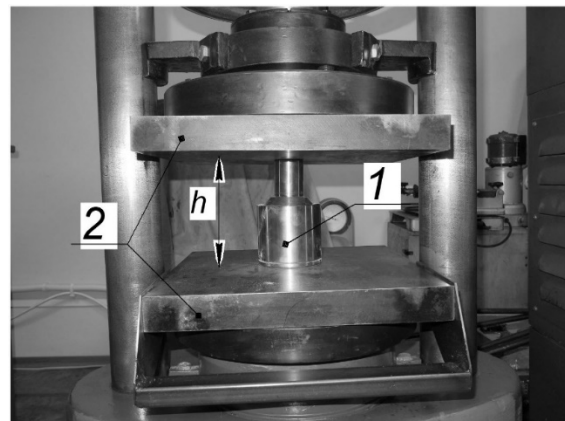


Рис. 2. Загальний вигляд преса ГП-50 для стиснення експериментальних зразків: 1 експериментальний зразок; 2 плити преса; h - висота зразка (м).

На рис. 3 представлені графіки зміни висоти зразка h , (м) від величини стискаючого навантаження F (Н) для експериментальних зразків із породи різного гранулометричного складу. Ці графіки представляють компресійні криві, які

характеризують стисливість закладних масивів.

З рис. 3 видно, що ущільнення породи в сталевому циліндрі при стисканні, відбувається по нелінійному закону.

Відносну деформацію зразка після проведення дослідів, визначили з виразу [12,13]

$$\lambda = \frac{\Delta h}{h}, \quad (1)$$

де Δh - зміна висоти зразка, м;
 h - початкова висота зразка, м.

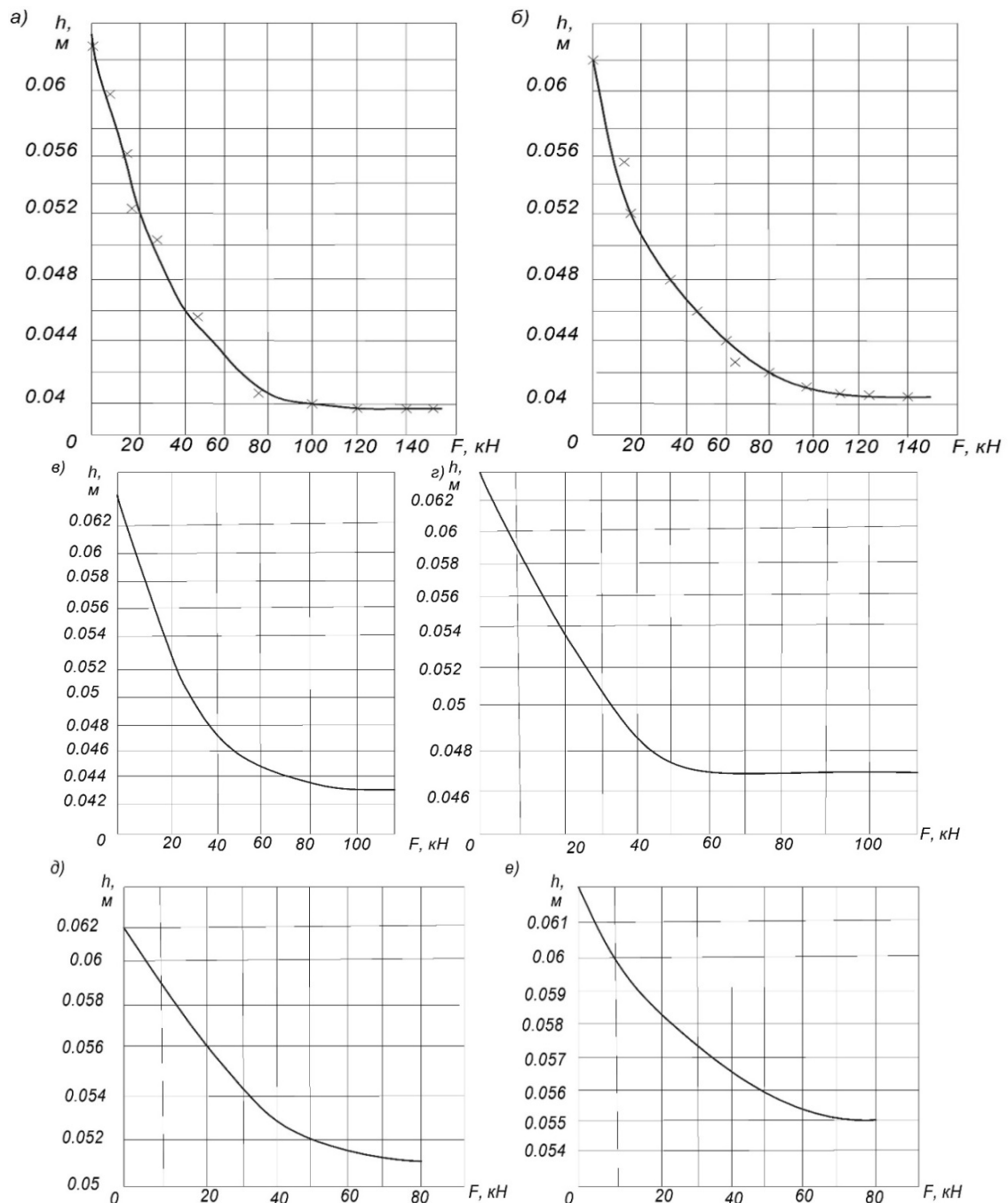


Рис. 3. Графіки зміни висоти експериментального зразка h (м) із породи різного гранулометричного складу від величини стискаючого навантаження F (кН): а- розмір фракції 0,1-5мм; б- розмір фракції 4-5 мм; в- розмір фракції 3-4 мм; г-розмір фракції 2-3 мм; д- розмір фракції 1-2 мм; е- розмір фракції 0,1-1 мм.

При виконанні експериментів, в результаті компресійного стиску зразка спостерігалось зменшення об'єму закладного матеріалу, а значить, відбувалася зміна його пористості. Для експериментального зразка при його стисненні, коли діаметр циліндру не змінюється, зі співвідношення

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta M}{M},$$

можна визначити відносну зміну його пористості ΔM (%) з виразу

$$\Delta M = M \cdot \frac{\Delta V}{V}. \quad (2)$$

Відомо [15], що при компресії, деформування експериментального зразка відбувається в результаті об'ємного стиснення. При цьому відносна вертикальна деформація, дорівнює відносній зміні об'єму ΔV (м³).

Відносна зміна об'єму ΔV (м³) визначається з виразу

$$\Delta V = V_H - V_K,$$

або

$$\Delta V = V \cdot \frac{\Delta h}{h}. \quad (3)$$

Дані лабораторних досліджень представлені в табл. 3.

Таблиця 3 - Дані лабораторних досліджень за визначенням відносної деформації експериментальних зразків і зміни їх обсягу

Розмір фракції, мм	h, м	Δh , м	ΔV	λ	ΔM , %
0,1-5	0,063	0,023	0,000032	0,36	4,9
4-5	0,062	0,021	0,000029	0,33	6,4
3-4	0,063	0,02	0,000028	0,31	5,7
2-3	0,064	0,017	0,000024	0,26	3
1-2	0,062	0,011	0,000015	0,17	1,76
0,1-1	0,062	0,007	0,000009	0,11	0,8

Коефіцієнт ущільнення породи в сталевому циліндрі, визначався як відношення об'єму, який займав вихідний матеріал до ущільнення V_H (м³) до об'єму, який він займає після ущільнення V_K (м³) [14].

Для показника стиснення експериментального зразка, застосовували модуль стиснення Δp (мм/м) закладного масиву

$$\Delta p = 1000 \cdot \frac{\Delta h}{h}. \quad (4)$$

Згідно [15], значення модуля стиснення Δp (мм/м) характеризує величину стиснення стовпа породи різного гранулометричного складу висотою в 1 м при застосуванні додаткового навантаження.

Дані експериментальних досліджень по визначенню коефіцієнта ущільнення породи $k_{уш}$ і модуля стиснення Δp (мм/м), наведені в табл. 4.

Таблиця 4 - Дані лабораторних досліджень за визначенням характеристик компресійного стиснення дробленої породи різного гранулометричного складу

Розмір фракції, мм	V_H , м ³	V_K , м ³	$\Delta V/V$	$k_{уш}$	Δp , мм/м
0,1-5	0,000088	0,000056	0,36	1,57	360
4-5	0,000086	0,000057	0,33	1,51	330
3-4	0,000088	0,00006	0,31	1,46	310
2-3	0,000089	0,000065	0,26	1,36	260
1-2	0,000086	0,000071	0,17	1,21	170
0,1-1	0,000086	0,000077	0,11	1,11	110

Для того, щоб при стисканні експериментального зразка змінити його висоту на величину Δh (м), необхідно

прикласти силу F (Н), значення якої визначається за виразом

$$F = \Delta h \cdot \frac{E_K \cdot S}{h}, \quad (5)$$

де E_K - компресійний модуль деформації, Н/м²;
 S - площа експериментального зразка, м²;
 h - початкова висота експериментального зразка, м.

З виразу (5) визначаємо значення компресійного модуля деформації

$$E_K = \frac{Fh}{S\Delta h} = \sigma \frac{h}{\Delta h}, \quad (6)$$

де σ - навантаження, що прикладається к зразку, Н/м².

Зовнішні сили, при деформації експериментального зразка із породи, здійснюють певну роботу. Вважаємо, що елементарна робота стискаючої сили на дільниці dh , дорівнює dF . Повна робота, яку потрібно затратити для стиснення на величину Δh (м), дорівнює

$$A = \int_0^{\Delta h} Fdh = \frac{E_K S}{h} \int_0^{\Delta h} h dh = \frac{E_K S}{h} \cdot \frac{(\Delta h)^2}{2}. \quad (7)$$

Помноживши і поділивши (7) на h^2 , отримаємо вираз

$$A = \frac{E_K V}{2} \cdot \lambda^2. \quad (8)$$

Використовуючи закон Гука [16, 17, 19, 20], коли

$$\sigma = E_K \cdot \lambda, \quad (9)$$

після відповідних перетворень, отримаємо вираз як в [18], для визначення роботи A (Дж), що витрачається на деформування експериментального зразка, тобто

$$A = \frac{\sigma^2}{2E_K} \cdot V. \quad (10)$$

Величина питомої роботи деформації A (Дж), є комплексним показником, який визначається сукупністю фізико-механічних характеристик закладного матеріалу. Дані експериментальних досліджень по визначенню величини навантаження σ (МПа), що передається на експериментальний зразок, компресійного модуля деформації (МПа) і питомої роботи A (Дж), представлені в табл. 5.

Таблиця 5 - Дані лабораторних досліджень за визначенням величини навантаження σ (МПа), що передається на зразок, компресійного модуля деформації σ (МПа) і питомої роботи A (Дж)

Розмір фракції, мм	σ , МПа	E_K МПа	A , Дж
0,1-5	34,8	95,3	0,00055
4-5	30,6	90,2	0,00044
3-4	27,9	87,8	0,00039
2-3	25,5	96,1	0,0003
1-2	21	118,3	0,00016
0,1-1	16,2	142,5	0,00007

Слід зазначити, що закладні масиви із подрібненої породи є складні об'єкти досліджень, фізичні характеристики яких залежать від великої кількості факторів. В цьому дослідженні встановлені в експериментах значення параметрів дають оцінку реальним властивостям закладних масивів з деякою погрішністю (до 13%).

На рис.4 представлені графіки, що відображають зміну пустотності M (%) і компресійного модуля деформації σ (МПа) закладного масиву, що має різну насипну щільність $\rho_{н.щ}$ (кг/м³).

З рис.4 видно, що при компресійному стискуванні породи, її пустотність змінюється в залежності від гранулометричного складу. Зазначено, що зі збільшенням з $\rho_{н.щ} = 1680$ (кг/м³) до $\rho_{н.щ} = 1940$ (кг/м³), значення ΔM (%) зменшуються, відповідно, з $\Delta M = 6,4\%$ до $\Delta M = 0,8\%$. Компресійний модуль деформації приймає мінімальні значення, рівні $E_K \approx 90$ МПа при насипної щільності $\rho_{н.щ} = 1780$ (кг/м³), а потім збільшується до $E_K = 142,5$ МПа при $\rho_{н.щ} = 1940$ (кг/м³).

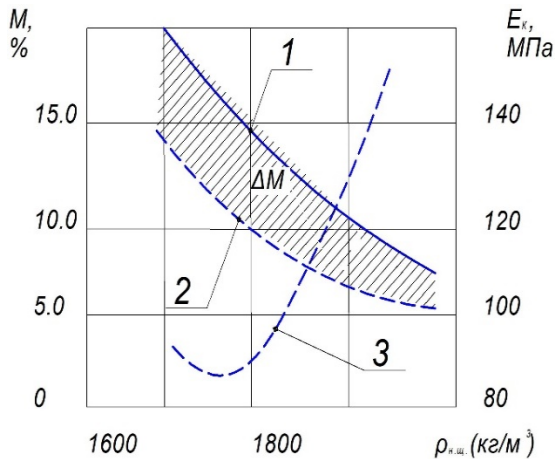


Рис. 4. Графіки зміни пористості M (%) і компресійного модуля деформації E_k (МПа) певної насипної щільності $\rho_{н.щ}$ (кг/м³) вихідного матеріалу: ΔM - величина зміни пористості; 1- пористість закладного масиву до стиснення; 2- пористість закладного масиву після стиснення; 3- E_k (МПа).

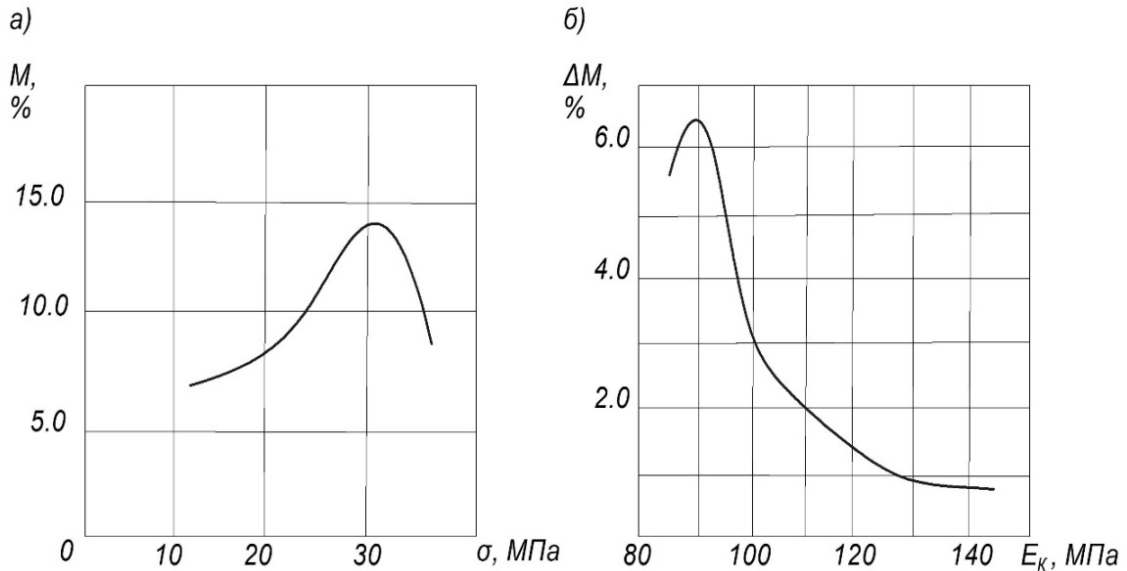


Рис. 5. Графіки зміни пористості експериментального зразка: а) від величини стискаючого навантаження σ (МПа); б) від величини компресійного модуля деформації E_k (МПа).

На рис. 6 представлені графіки, що відображають зміну коефіцієнта ущільнення дробленої щільності $\rho_{н.щ}$ (кг/м³) і відносна зміна обсягу експериментального зразка $\Delta V/V$ при стисненні, з урахуванням компресійного модуля деформації E_k (МПа). Встановлено, що мінімальні значення компресійного модуля деформації E_k (МПа), мають місце при максимальних

При збільшенні навантаження, яке прикладається к зразку в результаті стиснення, відбувається зменшення пористості породи в компресійному приладі. Зафіксовано, що зі збільшенням навантаження з $\sigma = 16.2$ МПа до $\sigma = 34.8$ МПа, порожнистість експериментальних зразків зменшується з $M = 13.6\%$ до $M = 7.2\%$, в залежності від гранулометричного складу породи (рис.5а).

При максимальній зміні пористості експериментального зразка, коли $\Delta M = 6.2\%$, значення компресійного модуля деформації приймають мінімальні значення. Мінімальним значенням $\Delta M = 0.8\%$, відповідають максимальні значення $E_k = 142,5$ МПа (рис.5б).

значеннях коефіцієнта ущільнення породи $k_{ущ} = 1,56-1,57$, коли насипна щільність вихідного матеріалу відповідає $\rho_{н.щ} \approx 1780$ (кг/м³) (рис. 6). Така величина насипної щільності поєднується з максимальним значенням зміни відносного об'єму породи при стисненні, коли $\Delta V/V = 0,36$ (рис. 6б).

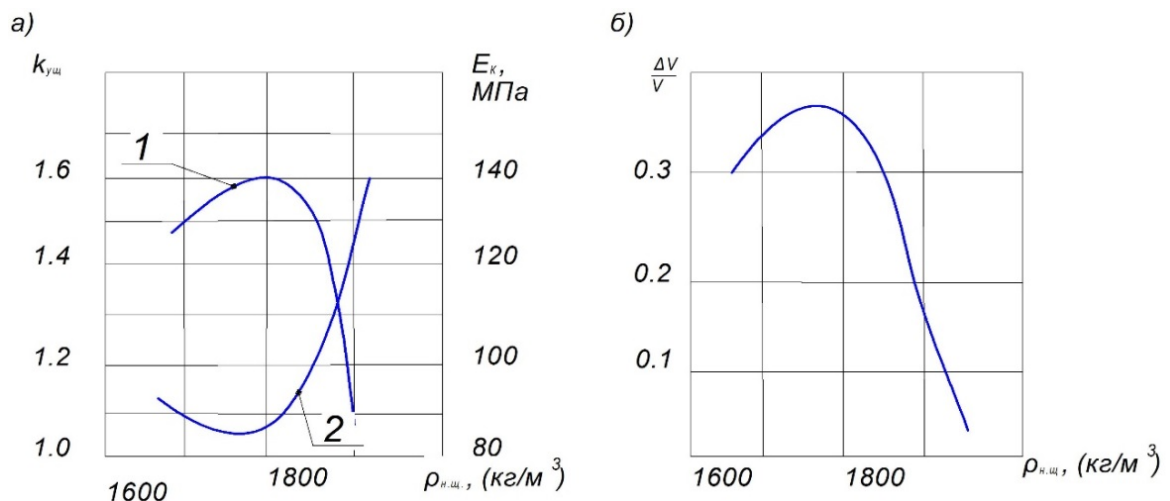


Рис. 6. Графіки зміни а) коефіцієнта ущільнення породи $k_{уц}$ в сталевому циліндрі і компресійного модуля деформації E_K (МПа), б) відносного обсягу вихідного матеріалу $\Delta V / V$ в результаті стиснення при певній насипній щільності $\rho_{н.щ}$ (кг/м³): 1- $k_{уц}$; 2- E_K (МПа).

Аналізуючи встановлені залежності, можна вважати, що при неоднорідному гранулометричному складі породи, має місце її максимальне ущільнення (коефіцієнт ущільнення $k_{уц} = 1,57$) і значне зменшення обсягу (відносна зміна обсягу $\Delta V/V = 0,36$). Значення компресійного модуля деформації для таких умов, коли закладний масив представлений

неоднорідною фракцією породи розміром 0,1–5 мм, знаходяться в межах $E_K \approx 90$ –96 МПа (рис. 7а).

Максимальної зміни обсягу, відповідає значення навантаження $\sigma = 34,8$ МПа, яке докладається до експериментального зразка (рис. 7б).

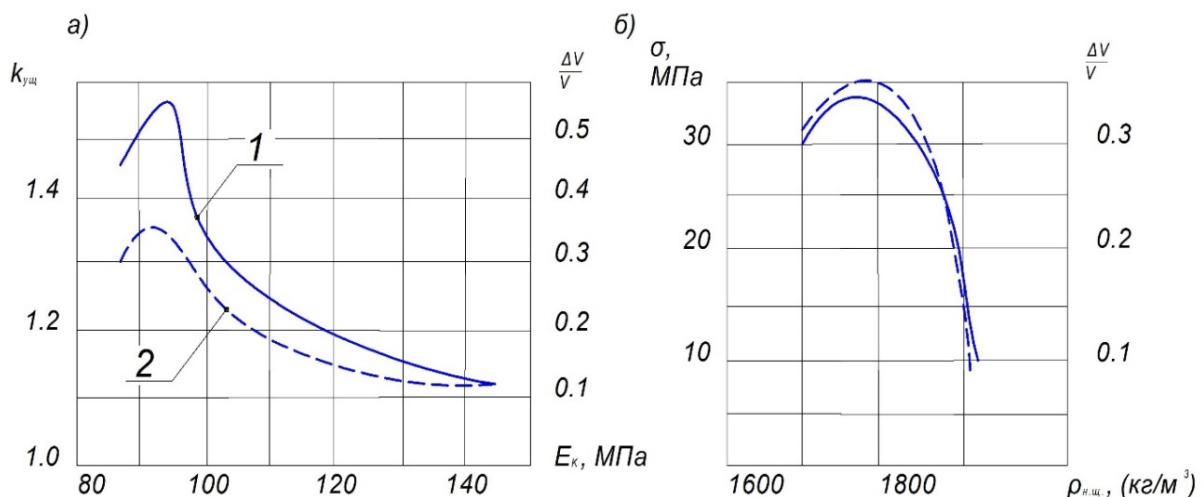


Рис. 7. Графіки зміни коефіцієнта ущільнення подрібненої породи $k_{уц}$, відносного обсягу $\Delta V / V$ і величини навантаження σ (МПа), що прикладається до експериментального зразка при стисненні, з урахуванням компресійного модуля деформації E_K (МПа) і насипний щільності $\rho_{н.щ}$ (кг/м³): 1 - $k_{уц}$; 2 $\Delta V / V$; 3 σ (МПа).

На рис. 8 представлений графік зміни модуля стиснення експериментального зразка $\Delta \rho$ (мм/м) від модуля компресійної деформації E_K (МПа).

З рис. 8 видно, що максимальне значення модуля стиснення, що дорівнює

$\Delta \rho = 360$ мм/м, відповідає $E_K \approx 95,3$ МПа, коли зразок породи представлений неоднорідною фракцією (0,1–5 мм). Потім значення модуля стиснення зменшуються до $\Delta \rho = 110$ мм/м при $\rho_{н.щ} = 1940$ (кг/м³), коли в

сталевому циліндрі знаходиться порода дрібної фракції (0,1–1 мм).

Зі збільшенням стискаючого навантаження з $\sigma = 16,2$ МПа до $\sigma = 34,8$ МПа, відбувається збільшення модуля стиснення, відповідно, з $\Delta\rho = 110$ мм/м до $\Delta\rho = 360$ мм/м. При цьому, збільшується значення питомої роботи A (Дж), що витрачається на деформування експериментального зразка (рис. 9).

Значення питомої роботи зростає з $A = 0,00007$ Дж до $A = 0,00055$ Дж при збільшенні відносної лінійної деформації зразка з $\lambda = 0,11$ до $\lambda = 0,36$. Такому зростанню відповідає збільшення стискаючого навантаження σ (МПа) (рис. 9б)

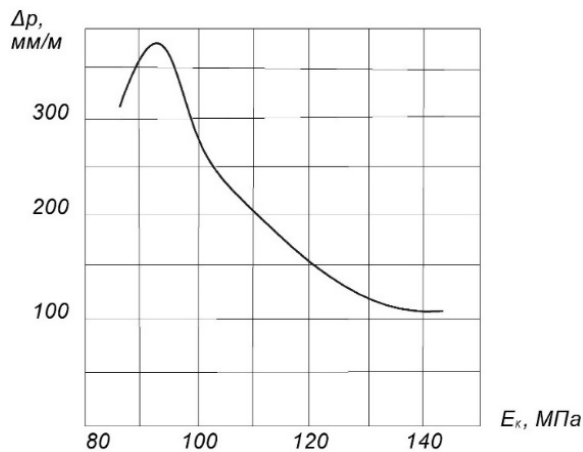


Рис. 8. Графік зміни модуля стиснення експериментального зразка $\Delta\rho$ (мм / м) від модуля компресійної деформації E_k (МПа).

Величина питомої роботи A (Дж), що витрачається на деформування одиниці об'єму експериментального зразка, залежить від насипної щільності породи $\rho_{н.щ.}$ (кг/м³) (рис. 10). Зі збільшенням насипної щільності з $\rho_{н.щ.} = 1780$ кг/м³ до $\rho_{н.щ.} = 1940$ кг/м³, величина питомої роботи зменшується в 7, 8 рази (рис.10).

Обговорення результатів досліджень фізико-механічних характеристик закладних масивів.

В результаті виконаних досліджень визначені фізико-механічні характеристики закладних масивів, що складаються із породи різного гранулометричного складу і призначені для підтримки бічних порід у виробленому просторі виїмкової дільниці вугільної шахти.

Деформаційні властивості породи різного гранулометричного складу є одні з найбільш важливих фізико-механічних характеристик закладних масивів. Оцінювали ці властивості в лабораторних умовах, вивчаючи компресійну стисливість вихідного закладного матеріалу (рис.1, 2, 3).

Як показники, що характеризують здатність закладних масивів змінювати розміри в умовах компресійного стиску, використовували компресійний модуль деформації E_k (МПа) і відносну лінійну деформацію λ експериментальних зразків в напрямку застосування зовнішнього навантаження. Ці показники відображають склад і стан закладних масивів, що дає підставу для їх співставлення.

При компресійному стискуванні дробленої породи, значення модуля деформації закладного масиву змінюється від $E_k = 90,2$ (МПа) до $E_k = 142,5$ (МПа) (вираз (6), табл. 5). Причому, для закладних масивів, які представлені неоднорідною породою з розміром фракції 0,1–5 мм, величина модуля деформації відповідає $E_k = 95,3$ (МПа). Зі зменшенням розміру фракції до 0,1–1 мм, коли закладний масив складається дрібною однорідною породою, величина E_k (МПа) зростає до максимальних значень $E_k = 142,5$ (МПа).

Одночасно, максимальне значення відносної лінійної деформації $\lambda = 0,36$, зафіксовано при стисненні породи, з розмірами частинок 0,1–5 мм, а мінімальне значення $\lambda = 0,11$, при наявності в закладного масиву однорідних дрібних фракцій, розміром 0,1–1 мм (вираз (1), табл. 3). Досліджувані показники деформаційних властивостей, отримані лабораторними методами, відображають напружено-деформований стан закладних масивів при дії на них зовнішньої сили.

Величина питомої роботи A (Дж), що витрачається на деформування закладного масиву (вираз (10), табл. 5) збільшується в міру зростання модуля стиснення $\Delta\rho$ (мм/м), а значить, зменшення загального об'єму породи. Чим більше модуль стиснення закладного масиву $\Delta\rho$ (мм/м), тим більше робота деформації A (Дж). Найбільшим стисненням володіють закладні масиви, що складаються з неоднорідних за розмірами частинок породи. Зі збільшенням насипної щільності $\rho_{н.щ.}$ (кг/м³) дробленої породи,

коли розмір фракцій зменшується до 0,1–1 мм, величина стиснення також зменшується (рис. 6а, табл. 4).

Значення коефіцієнта ущільнення $k_{ущ}$ породи залежить від її гранулометричного

складу та змінюється по мірі зростання насипної щільності $\rho_{н.щ.}$ (кг/м³) (рис. 6а, табл. 4).

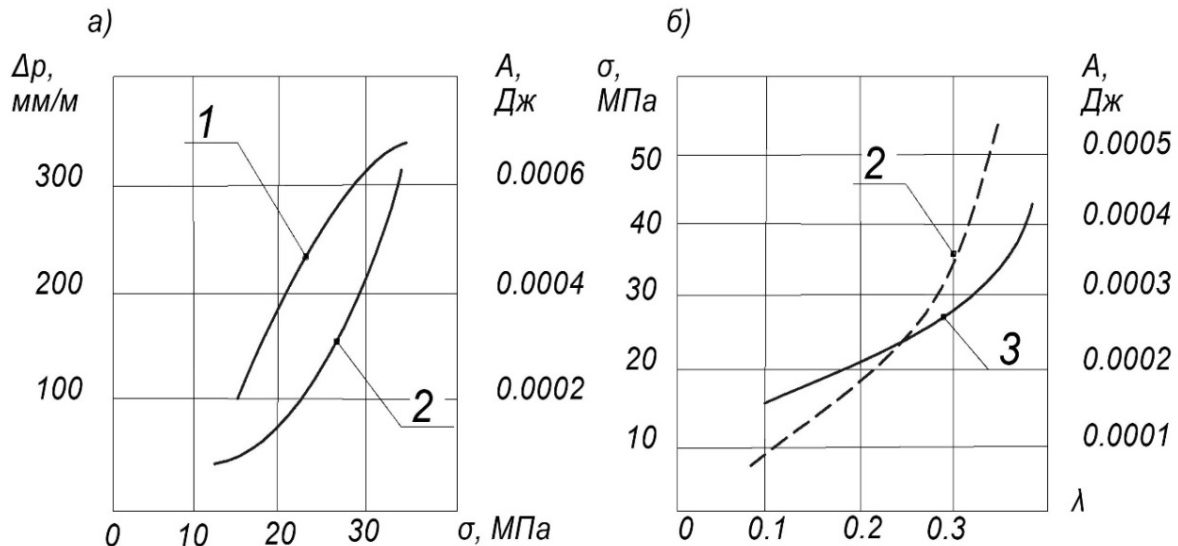


Рис. 9. Графіки зміни (а) модуля стиснення D_p (мм/м) і питомої роботи A (Дж) від величини навантаження σ (МПа), що прикладається к зразку (б) з урахуванням відносної лінійної деформації λ : 1- D_p (мм / м); 2- A (Дж); 3- σ (МПа).

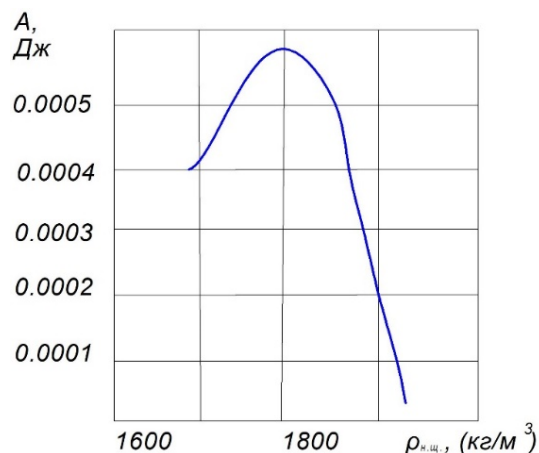


Рис. 10. Графік зміни величини питомої роботи A (Дж), що витрачається на деформування експериментального зразка від насипної щільності $\rho_{н.щ.}$ (кг/м³) породи.

Насипна щільність $\rho_{н.щ.}$ (кг/м³) породи, яка має першорядне значення для визначення фізико-механічних характеристик закладних масивів і оцінки їх деформаційних властивостей, не може встановлюватися візуально, а тому повинна визначатися спеціальними дослідженнями.

Таким чином, деформаційні властивості породи різного гранулометричного складу, відображають

реакцію закладного масиву на зовнішній вплив і є чинною оцінкою фізико-механічних властивостей, від яких залежить стійкість бічних порід в вуглепородному масиві, що вміщує виробки.

Висновок.

При проектуванні і експлуатації промислових споруд, в тому числі підземних гірничих виробок, враховують навантаження і вплив природного походження, а також вплив навантаження, що створюється в результаті людської діяльності. Для забезпечення стійкості покрівлі та збереження гірничих виробок, в таких умовах, доцільно орієнтуватися на застосування закладки виробленого простору. Закладні масиви із породи призначаються для підтримки бічних порід у виробленому просторі, коли обмежуються їх переміщення і забезпечується плавний прогин. Це досягається при дотриманні певних вимог, що пред'являються до закладних масивів. Фізико-механічні характеристики закладних масивів із породи різного гранулометричного складу, є визначальними при розрахунках основних параметрів технологічного обладнання для закладних робіт і виборі технічних рішень

щодо забезпечення стійкості бічних порід і гірничих виробок у вуглепородному масиві при веденні гірничих робіт.

Список літератури

1. Николин В.И., Подкопаев С.В., Агафонов А.В. Снижение травматизма от проявления горного давления. Донецк: Норд-пресс, 2005. 232 с.
2. Левкин Н.Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины. Донецк: Донбасс, 2002. 393 с.
3. Андрушко В.Ф., Саракитянц С.А., Спицын Ю.Г. Управление кровлей в сложных горно-геологических условиях Киев: Техника, 1985. 128 с.
4. Селезень А.Л., Томасов А.Г., Андрушко В.Ф. Поддержание подготовительных выработок при разработке крутых пластов. Москва: Надра, 1977. 205 с.
5. Чепіга Д.А. Обґрунтування та розробка способів підвищення безпеки праці гірників у виїмкових ділянках глибоких шахт: автореф. канд. техн. наук: 05.26.01 / ДонНТУ. Покровськ, 2019. 24 с.
6. Викторов С.Д. Иофис М.А., Гончаров С.А. Сдвижение и разрушение горных пород. Москва: Наука, 2005. 277 с.
7. Кипко А.Э., Чепига Д.А., Подкопаев Е.С. О проявлении природных опасностей при поддержании выработок в сложных горно-геологических условиях. *Вісник Криворізького нац. ун-ту. Збірник наук. праць. Кривий ріг*. 2016. Вип.41. С.17-22.
8. Жуков В.Е. Об одной стратегической ошибке в разрешении проблемы разработки крутых пластов. *Уголь Украины*. 2001. №7. С.6-10.
9. Подкопаев С.В., Гавриш Н.Н., Деглин Б.М., Каменец В.И. Лабораторный практикум по курсу «Механика горных пород». Донецк: ДонНТУ, 2012. 36с.
10. Гурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва: Высшая школа. 1998. 479 с.
11. Розанов Ю.А. Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1985. 320 с.
12. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П., Сдвижкова Е.А. Геомеханика. Киев: Новый друк, 2016. 528с. ISBN 978-617-635-088-0
13. Борщ-Компониц В.И. Практическая механика горных пород. Москва: «Горная книга», 2013. 322с. ISBN 978-5-98672-342-6.
14. Механіка гірських порід. / За загальн. ред. С.С. Гребньонкіна і М.М. Гавриша. Донецьк: ДонНТУ, 2004. 169с. ISBN 966-7559-92-0
15. Цытович Н.А. Механика грунтов. Москва: Высшая школа, 1979. 272с.
16. Тимошенко С.П., Gere Дж. Механика материалов. Санкт Петербург: «Лань», 2002. 672 с. ISBN:5-9511-0003-8.
17. Трофимова Т.И. Курс физики. Москва: Изд. центр «Академия», 2006. 560с. ISBN 5-7695-2629-7.
18. Мешков Ю.Я. Концепция критической плотности энергии в моделях разрушения твердых тел/ Успехи физ.мет./ Usp.Fiz.Met. 2001. Т.2- с.7-50 PACSnumbers: 62.20.Dc, 62.20Mk, 65.40 De, 65.70.+y, 65.80+n, 68.35 Md

19. Beer F.P., Johnston E.R., De Wolf J.T., Mazurek D.F. Mechanics of Materials. New York: Mc Graw- Hill Educations, 2015. 896 p.

20. Subramanian R. Strength of Materials. UK: Oxford University Press, 2010. 1041 p.

References

1. Nikolin V. I., Podkopayev S.V., Agafonov A.V. (2005). Snizheniye travmatizma ot proyavleniya gornogo davleniya. Donetsk: Nord-press. (in Russian).
2. Levkin N.B. (2002). Predotvrashcheniye avari i travmatizma v ugo l'nykh shakhtakh Ukrainy. Donetsk: Donbass. (in Russian).
3. Andrushko V.F., Sarakityants S.A., Spitsyn Yu.G. (1985). Upravleniye krovley v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh. Kiev: Tekhnika. (in Russian).
4. Selezen A.L., Tomasov A.G., Andrushko V.F. (1977). Podderzhaniye podgotovitel'nykh vyrabotok pri razrabotke krutykh plastov. Moscow: Nadra. (in Russian).
5. Chepiha D.A. Obgruntuvannya ta rozrobka sposobiv pidvyshchennya bezpeky pratsi hirnykiv u vyimkovykh dil'nytsyakh hlybokykh shakht. (Master's thesis.). DonNTU, Pokrovsk. (in Russian).
6. Viktorov S. D., Iofis M. A., Goncharov S. A. (2005). Sdvizheniye i razrusheniye gornykh porod. Moscow: Nauka. (in Russian).
7. Kipko A.E., Chepiga D.A., Podkopayev Ye.S./ (2016). O proyavlenii prirodnykh opasnostey pri podderzhanii vyrabotok v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh. *Vіsник Krivorіz'kogo nats. un-tu. Zbirnik nauk. prats'.* Kryvyi Rih, №41, 17-22. (in Russian).
8. Zhukov V.Ye. (2001). Ob odnoy strategicheskoy oshibke v razreshenii problemy razrabotki krutykh plastov. *Ugol Ukrainy*, №7, 6-10. (in Russian).
9. Podkopayev S.V., Gavrish N.N., Deglin B.M., Kamenets V.I. (2012). Laboratorny praktikum po kursu «Mekhanika gornykh porod». Donetsk: DonNTU. (in Russian).
10. Gurman V.Ye. (1998). Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian).
11. Rozanov Yu.A. (1985). Teoriya veroyatnostey, sluchaynyye protsessy i matematicheskaya statistika. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury. (in Russian).
12. Shashenko A.N., Pustovoytenko V.P., Sdvyzhkova E.A. (2016). Heomekhanika. Kiev: Novyy druk. ISBN 978-617-635-088-0. (in Russian).
13. Borshch-Komponiyets V.I. (2013). Prakticheskaya mekhanika gornykh porod. Moscow: «Gornaya kniga». ISBN 978-5-98672-342-6. (in Russian)
14. Grebenkin S.S., Havrish M.M. (Eds.). (2004). Mekhanika hirsykh porid. Donetsk: DonNTU. ISBN 966-7559-92-0. (in Ukrainian).
15. Tsytovich N.A. (1979). Mekhanika gruntov. Moscow: Vysshaya shkola . (in Russian).
16. Timoshenko S.P., Gere Dzh. (2002). Mekhanika materialov. Sankt Peterburh: «Lan'». ISBN:5-9511-0003-8. (in Russian).
17. Trofimova T.I. (2006). Kurs fiziki. Moscow: «Akademiya». ISBN 5-7695-2629-7. (in Russian).
18. Meshkov Yu.Ya. (2001). Kontseptsiya kriticheskoy plotnosti energii v modelyakh razrusheniya tverdyykh tel. Uspekh fiz. met./ Usp.Fiz.Met. T.2, 7-50. PACSnumbers: 62.20.Dc, 62.20Mk, 65.40 De, 65.70.+y, 65.80+n, 68.35 Md

19. Beer F.P., Johnston E.R., De Wolf J.T., Mazurek D.F. (2015). Mechanics of Materials. New York: Mc Graw- Hill Educations.

20. Subramanian R. (2010). Strength of Materials. UK, Oxford University Press.

Надійшла до редакції 04.04.2020

Рецензент канд. техн. наук, проф. О.К. Носач.

Іорданов Ігор В'ячеславович - кандидат технічних наук, здобувач кафедри «Охорона праці», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: gendir@eme.kiev.ua.

Сімонова Юлія Ігорівна - аспірант кафедри «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

Петренко Андрій Віталійович - асистент кафедри «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: andrii.petrenko@donntu.edu.ua.

Король Антон В'ячеславович - аспірант кафедри «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: akoroly2017@gmail.com.

Подкопаяєв Євген Сергійович - аспірант кафедри «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: podkopayev96@gmail.com.

Каюн Олексій Петрович - аспірант кафедри «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: a.p.kayun@ukr.net

Єфремов Олег Ігорович - аспірант кафедри «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: 2207250@gmail.com.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF INSTALLATION ARRIVALS

Purpose of research. Investigation of physical and mechanical characteristics of embankments designed to support lateral rocks in the coal massif containing the workings.

Methods. To achieve this goal, experiments were performed on samples of rock of different particle size distribution, which were subjected to compression compressing.

Results. As a result of the performed researches the physical and mechanical characteristics of embedded arrays of rock of different particle size distribution were determined. It is established that the change in the emptiness of embedded arrays during compression compressing, in general, depends on the magnitude of the vertical normal stresses and the size of the rock fraction, their percentage in the total volume. With vertical relative deformations, when the expansion of the embedded array to the sides is impossible, the reduction in volume occurs due to repacking of rock particles with a constant volume of the solid part. In this case, the more heterogeneous the breed, the more efficient the repackaging process. Under the conditions of the one-dimensional problem, the specific work under compression, which is spent on deformation of the unit volume of the embedded array, increases as the bulk density of crushed rock decreases, when the compaction coefficient takes maximum values. The greater the work of deformation, the greater the compression modulus of the embedded array. The stress-strain state of embedded arrays is determined by the magnitude of the compressive force, bulk density of the rock and the compression modulus of deformation.

Novelty. It is proved that during compression compressing of embedded arrays of rock, the values of the modulus of deformation change in parabolic dependence and are determined by the particle size distribution of the source material. In the presence of inhomogeneous fractions of rock in the original embedded material, the values of the compression module take the minimum values and increase as the bulk density changes. Moreover, the smaller the fraction of the rock, the greater its bulk density and the value of the compression modulus of deformation of the embedded array.

Practical significance. To support the main or section workings in the method of roof control bookmark produced space, it is necessary to ensure the heterogeneity of the particle size distribution of the rock used. Compliance with this requirement will ensure maximum compression of the embedded array and the smooth deflection of the side rocks in the produced space, when unloading the carbonaceous array containing the workings.

Keywords: coal massif, bulk density, compression compressing, particle size distribution, deformation, load, method of protection, rock pressure

Iordanov Igor - Candidate of Technical Sciences, Public higher education institution Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).

E-mail: gendir@eme.kiev.ua.

Simonova Yuliia - graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).

E-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

Petrenko Andriy - assistant department, Public higher education institution Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).

E-mail: andrii.petrenko@donntu.edu.ua.

Korol Anton - graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).

E-mail: akoroly2017@gmail.com.

Podkopayev Yevgen – graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).

E-mail: podkopayev96@gmail.com.

Kayun Oleksiy- graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).

E-mail: a.p.kayun@ukr.net.

Oleh Yefremov - graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).

E-mail: 2207250@gmail.com.