

С. М. Стовпник, к.т.н. (НТУУ «КПІ»)

АКТИВУВАННЯ ГЛИНЯСТИХ ПОРІД СЛАБКОГО СТУПЕНЮ МЕТАМОРФІЗМУ ВИБУХОМ У РОЗЧИНІ В'ЯЖУЧОГО

S. M. Stovpnik (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

AKTIVATING CLAY ROCKS LESER DEGREE METAMORPHISM EXPLOSION IN A BINDER SOLUTION

Наведені результати теоретичного обґрунтування розкриття сольватної оболонки навколо часток глинястих мінералів створення імпульсу тиску від вибуху заряду. Визначені умови формування міцності слабо метаморфізованих порід. Виконана оцінка впливу факторів вибуху на твердіння в'язучого та визначені головні умови активування глинястих порід.

Ключові слова: сольватна оболонка, мінеральна частка, глинясті мінерали, тиск вибухових газів.

Приведены результаты теоретического обоснования раскрытия сольватной оболочки вокруг частиц глинистых минералов созданием импульса давления от взрыва заряда. Определены условия формирования прочности слабо метаморфизированных пород. Выполнена оценка влияния фактора взрыва на твердение вяжущих и установлены основные условия активизации глинистых пород.

Ключевые слова: сольватная оболочка, минеральная частица, глинистый минерал, давление взрывных газов.

The results of the theoretical study of disclosure solvation shell around the particles of clay minerals creating a pressure pulse from the explosion of the charge. The conditions for the formation of the strength of weak rocks metamorfizirovanyh The estimation of the impact of the explosion at the hardening factor binding and established the basic conditions for activation of clay rocks.

Key words: solvation shell, mineral particles, clay miner pressure explosive gases

Вступ. Широке розповсюдження порід глинистого складу при спорудженні гірничих виробок на глибинах до 500 м відзначається для геологічних умов переважаючої частини підземних споруд. Однак нормативними документами [1] передбачені суттєві обмеження при виконанні гірничих робіт, що супроводжуються водопроявами в глинистих породах. Це пов'язано з значною втратою міцності порід при зволоженні, порушеннях технологічних процесів вантаження і транспортування при обводненні і т.д.

З іншої сторони, досить широкий перелік заходів по інженерному регулюванню властивостей порід глинистого складу має обмежене застосування в підземних умовах за факторами технологічності виконання, безпеки робіт і вартості здійснення.

Мета роботи. Актуальність задачі інженерного формування властивостей глинястих порід підтверджується статистичними даними по вугільних підприємствах

[2], де понад 50% випадків порушення паспортного стану виробок відбувається у межах геологічного перерізу, представленому глинистими породами.

Результати досліджень. Найбільш поширеними в наведених умовах залягання (до 80% площі структурного розрізу) визначаються напівскелясті породи представлені аргілітами та алевролітами слабого ступеню метаморфізму, що відрізняються наявністю зв'язків між мінеральними частинками, на жорсткість яких може впливати вологонасичення [3]. Під дією води сили зчеплення між частинками слабшають аж до зникнення, жорсткість мінерального кістяка може бути порушена проявами пластичності. Щільність напівскелястих порід складає 2,2–2,65 г/см³, а пористість – 10–15%. Водопроникність цих порід визначається розвитком тріщинуватості і ступенем вивітреності, причому коефіцієнт фільтрації може перевищувати 30 м/добу. За міцністю у напівскелястих породах спостерігається значна диференціація: міцні (15–50 МПа), середньої міцності (2,5–15 МПа) і менше 2,5 МПа – слабкі породи [3].

Головні структурні складові цих порід представлені мінералами групи каолініту, гідрослюди та монтморилоніту, причому мінерали монтморилоніту найбільш схильні набухання при зволоження, та відрізняється високою дисперсністю і розпливчастістю обрисів кристалів, пластівчастим складанням і орієнтованим розташуванням утворюючих агрегатів. Характерна ознака – змінний вміст води, який залежить від вологості навколишнього середовища. Між пакетами кристалів проникає вода і розсовує кристалічну решітку, обумовлюючи сильне набухання частинок. Збільшення обсягу досягає 25...30%, а напруги, що виникають при набуханні, досягають 0,1...1,1 МПа, що дорівнює міцності породи на розтягнення, і може стати причиною руйнування.

Оцінка ступіню впливу вологості на втрату міцності виконана методом найменших квадратів за результатами геологічного опробування кернавого матеріалу, накопиченого Павлоградською геологорозвідувальною експедицією. Рівняння регресії, що зв'язують відносну зміну міцності глинистих порід при відносній зміні вологості, мають вигляд:

- для аргілітів:

$$\Delta\sigma_{сж} = 0,11 + 0,7 \cdot \Delta W - 1,44 \cdot \Delta W^2 + 1,8 \cdot \Delta W^3; \quad (1)$$

- для алевролітів:

$$\Delta\sigma_{сж} = 2,73 \cdot \Delta W - 0,3 - 5,73 \cdot \Delta W^2 + 4,2 \cdot \Delta W^3, \quad (2)$$

де $\Delta\sigma_{сж}$ – відносна зміна міцності порід на стисення; ΔW – відносна зміна природної вологості порід в масиві.

Коефіцієнт кореляції наведених залежностей (0,87) підтверджує переважаючий вплив води на формування міцності глинистих порід.

Як відомо [4], наявність некомпенсованих зарядів на поверхні мінеральних часток і взаємодія з дипольними молекулами води призводить до

утворення на поверхні мінералів сольватних оболонок води у вигляді плівок товщиною декілька шарів молекул води.

Відповідно до закону про взаємодію електрично різнополюсних зарядів дипольні молекули води розташовуються перпендикулярно до поверхні мінеральної частки, що для випадків овальної і плоскої поверхні частинок (рис.1, а і б). Для уламкових частинок глинистих порід при лускатій формі мінеральних агрегатів відповідне розташування диполів води вздовж гострих граней частинки створює зменшення щільності оболонок (рис. 1, в). У цьому випадку руйнування водних оболонок навколо мінеральної частки вимагає докладання меншої енергії, адже, крім подолання енергії зв'язків між диполем і атомом частинки, не потрібна витрата енергії на подолання опору розриву щільних рядів молекул в шарі фізично зв'язаної води. За оцінками [5], енергія ковалентних та іонних зв'язків становить 200...1200 кДж, молекулярні та водневі зв'язки мають енергію 4...40 кДж, енергія магнітної взаємодії частинок має той же порядок величини. Слід зазначити, що ковалентні та іонні зв'язки діють на близькій відстані (0,1...0,2 нм), магнітні зв'язки діють на відстанях 0,45...0,5 нм і далі. Відповідне зниження енергії зв'язку становить 30...50 разів.

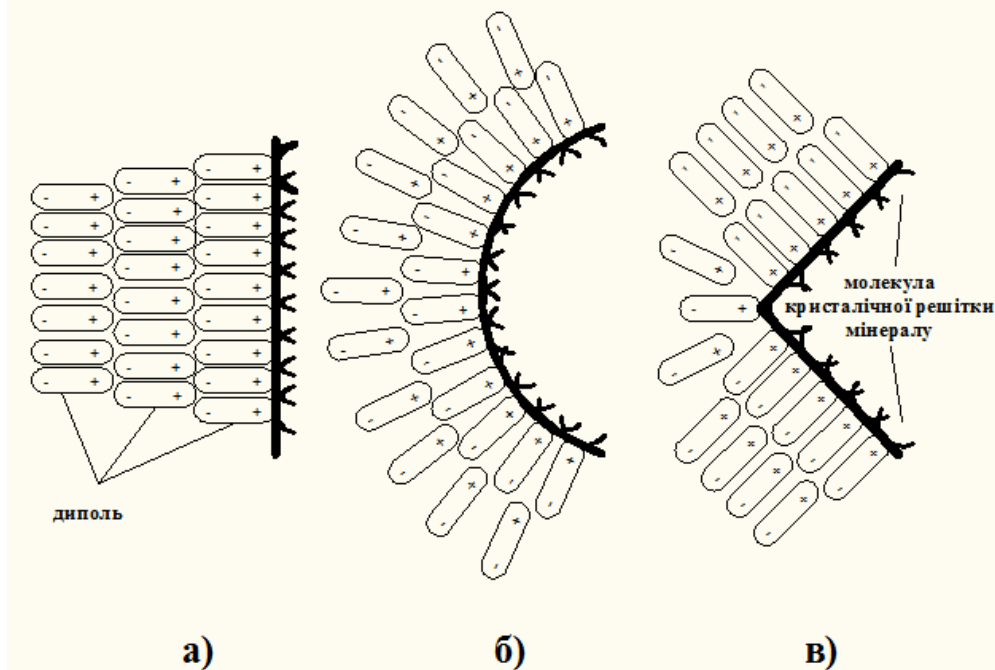


Рис. 1. Схема розташування дипольних молекул в залежності від форми поверхні частинки:
а – для овальної, б) – для плоскої, в) – для гострокутної

Зазначений ефект зменшення щільності сольватних оболонок на ребрах кристалічної решітки мінеральних часток і наявність великої кількості уламкового матеріалу мінералів представляє можливість звільнення поверхні мінеральної частки від водної оболонки. При створенні спрямованого механічного навантаження, напруги якого перевищать енергію зв'язку частки і молекул води (більше 40 кДж), буде забезпечене руйнування зв'язку між дипольними молекулами води і мінеральною часткою. Здійснити зазначений

вплив можна у вигляді створення об'ємного імпульсу тиску, що поширюється у водному середовищі у вигляді сферичного розширення хвилі, при заповненні порожнини у породі гідравлічним середовищем і виконанні вибуху в центрі цього середовища. Перепад тиску на фронті ударної хвилі здійснює концентрований вплив на загострену поверхню мінеральної частки і, відбиваючись від граней мінералу, забезпечує створення напружень в напрямку відриву водних оболонок від поверхні частинок. Враховуючи відсутність у рідини опору деформаціям зсуву, видалення сольватного шару досягає значного ефекту, що підтверджено дослідженнями структури зразків після обробки вибуховим нагнітанням розчином методом магнітно-ядерного резонансу [6].

Відсутність суттєвого зчеплення глинистих мінералів з мінеральними в'язкими пояснюється нейтралізацією активності глинистих часток при їх обгортанні сольватною оболонкою води, поступове збільшення тиску нагнітання при ін'єктуванні розчину призводить до обтиснення оболонки з дипольних молекул води, відповідно розкриття поверхні мінералів для контактування з частинками в'язкого не відбувається.

Вибух у розчині, що заповнює камуфлетну порожнину, викликає витискання рідини зі значною швидкістю під тиском вибухових газів (рис. 2).

З достатнім допущенням вирізняють наступні режими руху розчину під тиском вибухової сили [7]: ламінарна фільтрація Дарсі ($Re < 0,01$), комбінована фільтрація ($0,01 \leq Re < 100$), та інерційна фільтрація від вибухової сили ($R \geq 100$).

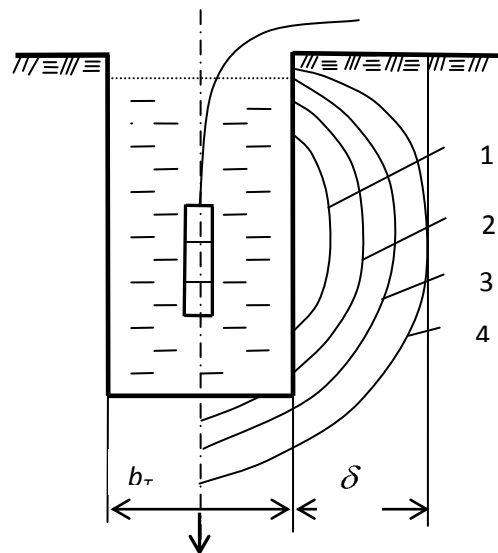


Рис. 2. Фронт руху розчину при підриванні заряду:

1 – початкова стадія, 2, 3 – розвиток фільтрації розчину, 4 – стадія затухання фільтрації

Число Рейнольдса Re струменя розчину визначається як співвідношення інерційної складової опору порід до динамічної в'язкості μ_0 :

$$Re = \frac{\Phi \beta / \alpha}{\mu_0}, \quad (3)$$

де α і β – в'язкісний і інерційний коефіцієнти опору гірської породи.

Інтегральний опір порід підшви руху розчину під тиском вибухових газів P складається з в'язкісної та інерційної складових:

$$-\frac{dP}{dZ} = \mu_0 \cdot \alpha \cdot u + \beta \cdot \rho_{жс} \cdot u^2, \quad (4)$$

де P – тиск; Z – координата; $\rho_{жс}$ – щільність розчину; μ_0 – динамічного коефіцієнта в'язкості; α – параметр зворотній до коефіцієнту проникності порід θ , тобто $\alpha = \frac{1}{\theta}$; u – швидкість фільтрації $u = \frac{G}{\rho_{жс}}$, де G – питома частина розчину яка контактує безпосередньо з вибуховими газами.

Інерційна частка опору руху розчину обумовлюється відхиленням векторного напрямку дії тиску вибуху від напрямку розповсюдження тріщинуватості. Напрямок тиску вибухових газів приймається радіальним у сферичній зоні навколо заряду, який розглядається як точковий і розміщений по центру камуфлетної порожнини. Система тріщинуватості навколо порожнини складається переважно з радіально і сферично направлених тріщин, тому по радіальних тріщинах слід очікувати значне просування розчину, а сферичні тріщини можуть заповнюватися недостатньо.

В'язкісна складова опору руху розчину залежать від щільності розчину, яка змінюється по мірі згущення розчину при початку його затвердіння. Крім того під дією високої температури вибухових газів частина води із складу розчину перетворюється у водяну пару, що додатково підвищує в'язкість розчину. Переміщення хмари водяного пару можна розглядати як процес стискання газу, що визначається співвідношенням тиску вибуху P і щільності водяної пари ρ_n , тобто $\frac{P}{\rho_n} = RT$, де R – газова постійна, T – температура води в стані утворення пари ($T > 100$ °C).

Переміщення водяної пари під дією тиску і температури вибухових газів у тріщинах може бути додатково враховано у (2.59) конвективною складовою у вигляді $n^{-2} \rho_{жс} u du / dZ$, де n – пористість породи, $\rho_{жс}$ – щільність розчину, u – швидкість фільтрації розчину.

Розрахунки показують, що при атмосферному тиску $P_v = 0,101$ МПа і температурному градієнті $gradT = 20$ °C/м відповідно до закономірностей ідеального газу швидкість руху водяного пару в глинистих породах складе не менш $4,5 \cdot 10^{-8}$ м/доб.

Роботу, що виконують вибухові гази при розширенні можуть бути оцінені за [8] як:

$$Q = AP(V - V_1), \quad (5)$$

де A – механічний еквівалент тепла, Дж; P – кінцевий тиск вибухових газів, МПа; V_2 та V_1 – кінцевий та початковий обсяги вибухових газів, м³.

Якщо прийняти, що початковий обсяг газів дорівнює об'єму патрону амоніту Т-19, а кінцевий – обсягу порожнин в породі, тоді робота складе $2,43(0,58)n$, де n – кількість молів газу при вибуху 1 кг обраної вибухівки. Розрахунок показує, що при остиганні газів до 20°C робота складе 230 ккал.

Якщо врахувати конденсацію водяного пару при остиганні вибухових газів, тоді треба зменшити отримане значення на $n \cdot 41,7$ кДж/моль, де n – кількість молей водяного пару у продуктах вибуху 1 кг вибухівки. Для нашого випадку підривання заряду відбувається у водяному розчині в'язучої речовини, тому присутність води є переважаючою. Розігрівання води, її випаровування, а потім конденсація водяного пару може бути враховано як подвійні витрати корисної дії вибухових газів на утворення водяного пару, що складає $240,6 \dots 282,5$ кДж/моль (2317 кДж/кг). Кінцевий обсяг роботи вибухових газів оцінюється у $150 \dots 170$ ккал при підриванні одного патрону амоніту Т-19.

Відповідно до другого початку термодинаміки перетворення вибухівки у певну кількість газів відбувається миттєво, тому початковий теплообмін практично відсутній і процес розширення вибухових газів відбувається за адіабатичною закономірністю. Для вибухівки з нульовим або негативним балансом кисню фактична теплота вибуху незначно залежить від ступеню розширення вибухових газів, тому загальна теплота може бути прийнята як детонаційна з врахуванням щільності вибухівки за залежністю [8]:

$$Q = A + Bq, \quad (6)$$

де A та B – коефіцієнти впливу, що складають за даними інституту хімічної фізики [] відповідно 630 і 220; q – щільність заряджання вибухівки, $0,9 \dots 1,1$ г/см³.

Наявність водяного середовища при вибуху заряду не відіграє роль наповнювача, тому що патрон амоніту Т-19 виконаний із зовнішнім парафінуванням обгортки, тому проникнення води у вибухівку обмежене.

Крім того, підривання заряду у розчині передбачає наявність щільної забивки устя шпуру без можливості прориву вибухових газів у атмосферу, тому втрати на нагрівання води і випаровування компенсуються в процесі конденсації водяних парів в межах порожнин в породах.

Для теоретичної оцінки впливу факторів вибуху на в'язучий розчин як головні прийняті два фактори: температура або теплота та тиск вибуху.

Розрахунок теплоти вибуху виконано за емпіричною формулою В.І Пепекіна [8]:

$$Q_v = Q_{max} [1 - (0,528 - 0,165p_0)(1,4 - \alpha)^{1,4}], \quad (7)$$

де Q_{max} – максимальна теплота вибуху, ккал; p_0 – щільність вибухової речовини, г/см²; α – кисневий коефіцієнт, %.

Розрахунок показує, що загальна теплота вибуху одного патрону амоніту Т-19 складе 1130 кДж (244 ккал). Якщо врахувати, що щільність заряджання патрону амоніту Т-19 складає $0,9 \dots 1,1$ г/см³, тоді похибка розрахунку за формулою (2.18) не перевищить 1,8%.

Температура вибуху розрахована за спрощеною методикою Г. Каста [8]:

$$T_g = Q_v \cdot 1000 / [\sum n_i (a_i + b_i t)] \quad (8)$$

де n_i – кількість молей у відповідних газах; a_i та b_i – коефіцієнти прийняті для випарів води відповідно 4,0 та $21,5 \cdot 10^{-4}$.

Отримана початкова температура вибуху для патрону амоніту Т-19 вагою 300г склала 2230°C , що може бути прийнята як мінімальна, тому що ця розрахункова методика надає занижені результати.

Теплоємність вибухових газів можна визначити:

$$C_e = \frac{Q \cdot 1000}{nT} \quad (9)$$

де Q – теплота вибуху, кДж/кг; n – кількість молів вибухових газів; T – температура вибуху.

Подальше співвіднесення теплоємності вибухових газів з теплопровідністю в'язучого розчину і теплоємністю оточуючих порід дозволило прийняти логарифмічний розподіл [8] і при початковій температурі середовища 20°C визначило зменшуючий температурний градієнт $145 \pm 5^{\circ}\text{C}$ на 1 см радіусу зони нагнітання. Таким чином, на початковому етапі вибуху підвищення температури оточуючого породного масиву відбувається в межах 0,23-0,51 м.

Тиск вибухових газів визначався з врахуванням суцільного заповнення зарядної камери в'язучим розчином без обліку тиску повітря, витисненого при заповненні тріщинуватості за рівнянням Абеля-Нобеля [8]:

$$P = R \cdot n \cdot \rho_z \cdot T_B (1 - \alpha \cdot \rho_z), \quad (10)$$

де R – газова постійна Больцмана; ρ_z – щільність заряджання, г/см³; α – коволіум, приймався 0,1% від обсягу вибухових газів (справедливо для вибухівки з щільністю 0,9-1.1 г/см³).

Максимальний тиск при вибуханні одного патрону амоніту Т-19 склав 149,5 МПа з поступовим його зменшенням при розширенні вибухових газів і витисненні розчину в оточуючу тріщинуватість, додаткове зменшення тиску відбувається при подовженні та розкритті тріщин, а також у випадку усунення матеріалу забійки поза устя шпуру (рис. 2). Остаточний тиск вибухових газів від підривання патрону амоніту Т-19 можна визначити:

$$p = q \cdot c / v, \quad (11)$$

де q – вага заряду одного патрону амоніту Т-19 (300 г); c – питоме газоутворення, л/кг (для амоніту Т-19 складає 724 л/кг); v – обсяг утворених в породі порожнин навколо одного шпуру ($0,031 \dots 0,053 \text{ м}^3$).

Розрахунок показує, що при збереженні забійки в усті шпуру остаточний тиск складає 4,1...7,0 МПа.

Механізм впливу вибуху на твердіння розчину передбачає створення фронту ударної хвилі, яка за рахунок високого тиску звільнює активну поверхню мінеральної частинки від дифузійного шару, складеного дипольними молекулами води, і активізує процес кристалізації, відбувається лавиноподібне збільшення центрів кристалізації і процес захоплення розчину прискорюється. У

випадку повільного підвищення тиску нагнітання відбувається обтискання сольватного шару води і прискорення кристалізації дуже незначне.

Виходячи з умови забезпечення розвитку тріщин, заповнених розчином, але передбачаючи збереження в'язучої здатності в'язучого, отримана умова вибухового нагнітання у вигляді ваги заряду вибухової речовини:

$$[V_p(\pi/3)^{1/2}]^{2/3} \cdot 4\epsilon E_p/k_2 \cdot \rho \cdot v_d > q_6 > V_p/k_1 \cdot R_l^{1/3}, \quad (12)$$

де V_p – обсяг розчину в порожнині, м³; E_p – енергія хімічних зв'язків в'язучого розчину; v_d – швидкість детонації, м/с; R – опір породи на розтягування, МПа; k_1 та k_2 – коефіцієнти приведення.

Висновки

Встановлено, що за наявності гострокутової форми поверхні мінералу розкриття сольватної оболонки відбувається за менших витрат енергії, що дозволяє скерованим імпульсом тиску в розчині досягнути контактування в'язучих часток з поверхнею мінеральної частинки. Умовою застосування наведеного ефекту є зона перевищення тиском вибухових газів міцності масиву порід, але не більше питомої енергії хімічних зв'язків у в'язучому.

Список використаних джерел:

1. Правила технической эксплуатации угольных и сланцевых шахт. - М.: Недр, 1976. - 303 с.
2. Бесков, М.И. Влияние горно-геологических факторов на стоимость поддержания подготовительных выработок / М.И. Бесков, А.Я. Градова, В.А. Родионовский – М.: ЦНИЭИуголь, 1967. – 45 с.
3. Ломтадзе, В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология / В.Д. Ломтадзе – Л.: Недр, 1984. - 511 с.
4. Маслов, Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / Н.Н. Маслов – М.: Высшая школа, 1968. – 624 с.
5. Чупрунов, Г.Д. Основы упрочнения горных пород / Г.Д. Чупрунов. – М.: Недра, 1965. – 152 с.
6. Стовпник, С.М. Використання глинистих порід вугільних шахт для виробництва цементного клінкера / С.М. Стовпник, О.О. Жданова, Л.В. Шайдецька // Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений» - Донецк.- ДонНТУ. - Вип. №13.- 2007 р. - С. 183-184 (розробка технології виконання робіт).
7. Заславский, Ю.З. Инъекционное упрочнение горных пород / Ю.З. Заславский [и др.] – М.: Недр, 1984. – 175 с.
8. Вовк, А.А. Основы прикладной геодинамики взрыва / А.А. Вовк. – К.: Наукова думка, 1976.- 274 с.

Стаття надійшла до редакції 05.10.2015 р.