

DOI: 10.20535/2707-2096.7.2022.267555

УДК 622.255.5:539.43

Ю. І. Войтенко, д.т.н.

ORCID: 0000-0003-3077-2207

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

В.В. Вапнічна*, к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0003-3938-4358

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

О.Ю. Войтенко, к.х.н.,

Інститут біоколоїдної хімії НАН України, Київ, Україна

* Відповідальний автор: v.vapnichna@kpi.ua

Стаття подана 12.05.2022; Стаття прийнята 13.06.2022

ПРО РУЙНУВАННЯ ТА РОЗМІЦНЕННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПІД ЧАС ВИБУХУ В ПЛАСТОВИХ УМОВАХ

Мета та завдання. Аналіз та уточнення механізмів розміцнення та зміни структури монолітних і малотріщинуватих ГП при вибухах одиночних і розосереджених зарядів, визначення причин та модель їх еволюції у пласті. Для вирішення поставленої мети в роботі були поставлені наступні наукові задачі:

1. Оцінка силових чинників зовнішньої дії на гірську породу.
2. Термодинамічний аналіз і виявлення механізмів структурних змін в ГП на значній відстані від свердловини, які забезпечують зміну її продуктивності.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач було проведено: розрахунки згасання амплітуд ударних хвиль, які генеруються під час вибуху зосереджених і подовжених зарядів; аналіз результатів вибухових обробок нафтових, нафтогазових і газових свердловин з позицій підземної гідродинаміки і механіки гірських порід; енергетичний аналіз процесів та механізмів змін, які відбуваються навколо свердловини в пласті.

Основні результати. Під час проведення досліджень було встановлено, що структурні зміни в ГП під час вибухів зарядів малої енергії, а також інших малоенергетичних методів зовнішньої дії на пласт відбуваються у вигляді розростання тріщинуватості ГП на мікро- і макрорівнях завдяки кооперативним ефектам від зовнішньої дії, внутрішньої енергії пласта і фізико-хімічному впливу пластових флюїдів.

В роботі розглянуто механізми знеміцнення гірських порід в пластових умовах за наявності гірського і пластового тиску при малоенергетичних зовнішніх впливах. Експериментально на прикладах роботи нафтових, нафтогазових і газових свердловин показано, що перехід системи «свердловина – пласт» із одного термодинамічного стану в інший відбувається за час, який залежить від внутрішньої енергії пласта. Перехід – результат дії кооперативних ефектів сумісної дії зовнішнього впливу, внутрішньої енергії пласта і гірського тиску. Для газових свердловин цей час не перевищує кількох годин, або днів, для нафтових і нафтогазових з глибинами залягання пластів 3000...4000 м характерний час виходу свердловини на максимальну продуктивність складає $\approx (30 - 90)$ днів.

Висновки та практичне значення. У результаті проведеного аналізу, в умовах промислових випробувань вибухової технології - інтенсифікації, а також на основі розрахунків згасання та стиснення хвильових амплітуд досліджено, що в умовах дії гірського тиску спостерігаються характерні структурні зміни у ГП, що обумовлено результатом вибуху кількох зарядів, який відбувається на відстані до $\approx (80...100) R_0$. У пластових умовах основною причиною появи таких протяжних зон підвищеної проникності навколо свердловини є кооперативні ефекти від спільної дії вибухових хвиль,

пластових газів (метан, діоксид вуглецю, гелій і, можливо, водень), а також зміна гірського тиску в пласті при зниженні рівня рідини в свердловині в процесі її освоєння. Практичне значення полягає у розумінні черговості технологічних операцій при проведенні роботи з інтенсифікації припливу нафти і газу.

***Ключові слова:** гірська порода; розміщення, руйнування; зовнішній вплив; кооперативні ефекти; гірський тиск; дисипативні структури.*

ВСТУП

Актуальність теми. Проблема розміщення, а в деяких джерелах розушільнення [1], георозпушування [2] гірських порід (ГП) є загальною для більшості способів розробки родовищ корисних копалин. Процес розміщення забезпечує зниження енергоємності виробництва, як на стадії буріння, так і на стадіях первинного та вторинного дроблення. З параметрами процесу розміщення кореляційними залежностями пов'язані міцнісні, деформаційні, акустичні та фільтраційні властивості ГП. Сейсмічна дія вибуху визначається втратами (дисипацією) енергії в зонах руйнування та розміщення, їх розмірами та концентрацією мікротріщин у зоні передруйнування. Проникність ГП навколо геотехнологічних свердловин визначає їх продуктивність в системах розробки родовищ руд радіоактивних металів шляхом підземного вилуговування, при видобуванні нафти і газу, при спорудженні підземних сховищ у солянокупольних структурах. Останній з перерахованих об'єктів може бути використаний для закачування та зберігання зеленого водню або його сумішей з метаном. В Україні є вибухові технології інтенсифікації будівництва таких об'єктів та досвід їх застосування на пострадянському просторі. Тому актуальність цього напряму досліджень поведінки ГП та їх розміщення не зменшується. Взагалі проблема розміщення та деформаційного руйнування ГП є однією з найважливіших при підземних гірничих роботах і їй присвячені численні статті та монографії, зокрема [3, 4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомі численні методи розміщення ГП при шахтних методах розробки родовищ корисних копалин [5]. В основному в них використовується енергія вибуху шпурових або свердловинних зарядів, також спрямований або орієнтований гідророзрив ГП.

При відкритих гірських роботах розміщення ГП в блоці, що відбивається від сусіднього, відбувається за рахунок взаємодії енергетичних потоків і хвильових полів в результаті вибухів груп свердловинних зарядів і частин цих зарядів, розділених інертними проміжками. Така взаємодія забезпечується завдяки технологіям короткосповільненого підривання [6]. Міцнісні властивості ГП поблизу відбитого блоку здатні впливати на швидкість буріння свердловин, а також на сейсмічний ефект подальшого масового вибуху. Близькі до цих технологічних схем способи та конструкції зарядів використовуються при розкритті продуктивних пластів та інтенсифікації припливу нафти та газу [7]. Останнім часом з'явилися статті, що пропонують нову парадигму гірничо-геологічних робіт у надрокористуванні [8]. Вона передбачає об'ємний вплив на поклади з корисними копалинами з метою розробки родовища на місці без виїмки. Новизна цієї парадигми досить умовна. Наприклад, стосовно рудних покладів технологія включає підготовку рудних тіл до обводнення або вилуговування, подачу через свердловини активного флюїду (пара, повітря, кислотний розчин і т.п.) і відкачування через свердловини збагаченого розчину. Підготовка зазвичай пов'язана з розміщенням, георозпушуванням та підвищенням проникності. Прикладом такої технології є сучасна технологія видобутку сланцевого газу в США, а також численні технологічні схеми підземного вилуговування уранових руд [9].

З фізичних міркувань визначальним параметром під час вибуху одиночного хімічного заряду в ГП є тиск на фронті ударної хвилі. При зменшенні його величини відбуваються кінетичні фазові переходи з утворенням різних дисипативних структур. В результаті утворюються зони дроблення, радіальних тріщин та передруйнування. Відомо кілька різних за фізичною природою механізмів розміщення ГП вибухом за межами зони радіальних тріщин. Відповідно до роботи [1], генерування у пласті потужного зсувного поля відбувається при

ультракороткоуповільненому підриванні сусідніх зарядів, розташованих на оптимальній відстані один від одного. Зсувне поле формується в результаті суперпозиції вибухових хвиль з оптимальним фазовим зсувом один до одного. Внаслідок дії динамічних зсувних напруг, починаючи з величин $\approx 1 \dots 10$ МПа відбувається незворотне об'ємне деформування – дилатансія ГП.

Згідно з [10, 11] та іншими численними джерелами в ГП є розсіяні мікро- і мезодефекти, а також макротріщини, зміна яких впливає на утворення нових порушень, що відбуваються під впливом дії хвилі у фазі розтягуючих кільцевих напруг за відсутності початкових напруг у ГП. Авторами досліджено, що з використанням високобризантних вибухових речовин (ВР) (тротил, ТЕН, гексоген) радіус зони передруйнування - розміщення в монолітному пісковнику досягає $60r_z$, а в монолітному граніті $40r_z$ (r_z – радіус заряду). В умовах наявності початкової напруги (гірського тиску) зміна розмірів початкових макротріщин можлива лише при дії динамічних зсувних напруг [11]. Експериментальні результати досліджень у [12] показали, що розміщення граніту при вибуху заряду ТЕНу відбувається насамперед завдяки появі мікродефектів у кристалах найбільш високомодульних мінералів – плагіоклазу та кварцу. Дані про залежність розмірів зони передруйнування від величини початкової напруги (гірського тиску) в літературі практично відсутні. Хоча у кількох джерелах, наприклад [13], показано, що розміри зони дроблення і зони радіальних тріщин зменшуються зі збільшенням гірського тиску. При збільшенні гірського тиску від 0,1 МПа до ≈ 50 -60 МПа розмір зони радіальних тріщин при вибуху зосередженого заряду в скельних ГП зменшується від величини $\approx (22 \dots 24)R_0$ до кількох R_0 (R_0 – радіус зосередженого заряду). Зона дроблення при цьому зникає, а кількість радіальних тріщин зменшується.

На думку автора [1] дилатансійне розуцільнення знижується зі збільшенням гірського та порового тиску, проте ця залежність проявляється слабо і стає відчутною під час проведення робіт на глибинах понад 10 км. Тим не менш, з фізичних міркувань зона передруйнування ГП також має зменшуватись із збільшенням гірського тиску. Відповідно до [10] розмір зони передруйнування зменшується в 1,5 рази зі збільшенням гірського тиску до 12 МПа. Відомий також ефект розміщення ГП при вибуху в обмежених зразках або масиві за наявності вільних поверхонь [14]. Вплив сили тертя берегів тріщини зсуву в геологічному середовищі, її поведінка при повільних навантаженнях, зазначена у роботі [15]. В [16] досліджено утворення мікротріщин у скельних породах при кумулятивному вибуху заряду ВР з низькою швидкістю детонації та лайнером сферичної форми.

Відомі численні приклади успішних інтенсифікуючих обробок пластів у свердловинах із застосуванням невеликих зарядів вибухових та горючих речовин та ще більш слабких впливів на пласт (електро вибух, вібраційні, акустичні обробки тощо), які важко пояснити з позицій механіки гірських порід та механіки руйнування [1, 7, 17].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є аналіз та уточнення механізмів розміщення та зміни структури монолітних і слаботріщинуватих ГП при вибухах невеликих одиночних і розосереджених зарядів, визначення причин та модель їх еволюції у пласті.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Методика дослідження. Відомо, що дисипація енергії у твердому тілі при малих навантаженнях відбувається лише при виникненні зсувних напруг. За відсутності початкових напруг вже при мінімальних навантаженнях (≈ 1 МПа) починається відхилення динамічного режиму деформування більшості гірських порід від пружного. У разі ГП, що містять кварц та близькі до нього за властивостями високомодульні матеріали, величина критичного навантаження визначається значенням ≈ 3 -10 МПа [17].

Для оцінки величини нормальних напруг у масиві під час вибуху зосередженого та подовженого зарядів кінцевої довжини скористаємося результатами робіт [1, 18]. В роботі [1] тиск на фронті хвилі стиснення розраховується за формулою (1):

$$p = k \left(\frac{r}{R_0} \right)^{-\mu} \quad (1)$$

де $k = \frac{\rho_{\text{вв}} D^2}{8}$; μ - показник загасання амплітуди хвилі в гірській породі з відстанню r , що залежить від фізико-механічних властивостей, зокрема, від міцності σ_0 ; $\rho_{\text{вв}}$, D - щільність та швидкість детонації, м/с; R_0 - радіус зосередженого заряду, мм. З використанням формули (1) можна в першому наближенні оцінити розмір зони дроблення з умови $p = \sigma_0$ (σ_0 - міцність ГП на стиснення), а також розмір області дилатансійного розщільнення з умови $p = (0,03 \dots 0,05) \sigma_0$. Розрахунки з використання формули (1) дають близькі до наведених вище значень для міцностей 60 МПа та 80 МПа: (1,8...3) МПа та (2,4...4) МПа. Відомі більш складні формули для опису імпульсу напружень при підриванні заряду ВР у ГП [19]. Проте для оцінювання достатньо формули (1).

У роботі [18] отримані узагальнюючі формули для масової швидкості частинок різних ГП за фронтом хвилі стиснення v_{rm} при вибухах подовжених зарядів та визначена область їх застосування при вибухах подовжених зарядів кінцевої довжини, що розраховується за формулою (2):

$$v_{rm} = 0,83 \frac{\varepsilon_0}{\rho c_l} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{-1,2} \quad (2)$$

де ε_0 - енергія в одиниці об'єму ВР; ρ - щільність ГП; c_l - швидкість поздовжніх пружних хвиль в ГП. Амплітуда хвилі напружень розраховувалась за формулою $\sigma_r = \rho c_l v_{rm}$.

Для оцінки напруг на фронті хвилі стиснення з використанням формул (1) та (2) розглянемо один із численних прикладів робіт з розкриття продуктивних пластів та інтенсифікації видобутку нафти та газу й проведемо інженерні розрахунки ефективного радіусу свердловини R_{ef} з використанням відомої формули підземної гідравліки (3):

$$\frac{q_1}{q_0} = \frac{\ln \left(\frac{R_{in}}{r_0} \right)}{\ln \left(\frac{R_{in}}{R_{ef}} \right)} = \beta, \quad (3)$$

де q_0, q_1 - початковий і кінцевий дебіти свердловини; r_0, R_{in} - початковий радіус живлення та радіус впливу свердловини.

Результати дослідження. Робота проводилася у свердловині №62 Острроверхівського родовища ДДВ. Свердловина має фактичну глибину 4598 м та штучний вибій на позначці 4560 м. Експлуатаційні горизонти візейського ярусу - В-22 (4500,2-4502,2 м), В-16 (4432,8-4437,4 м), В-15 (4386,4-4389,4 м; 4355,2-4357,8 м). Пластовий тиск в горизонті В-22 = 49,0-50,0 МПа, пластова температура - 131,5 °С. Свердловина обсаджена кондуктором 426×324 мм (висота цементу $H_{ц}$ до гирла), технічною колоною 245 мм до глибини 3726 м та експлуатаційною колоною 140×168 мм до глибини 4555 м. В інтервалі 4557-4593 м на позначці 4582 м встановлено міст. У горизонті В-22 експлуатаційна колона має діаметр 140 мм, марка сталі "Л", товщина стінки - 10,5 мм. Тип колектора в горизонті В-22 - поровий, можливо тріщинно-поровий (пісковик). Пористість 12 %, коефіцієнт нафтогазонасичення $k_{нг} = 0,95$, ефективна потужність $h_{\text{еф}}$ - 1,4 м. Початковий дебіт газу 5-10 тис. м³/доб. При підключенні пластів В-16 В-15 збільшення дебіту було незначним (0,5 тис. м³/доб). Після цього було проведено соляно-кислотну обробку, яка не дала бажаного результату.

При проектуванні проводилися розрахунки на міцність обсадної колони, розрахунок маси зарядів для підвищення продуктивності свердловини в 1,6-1,8 рази, розрахунок довжини шнура-уповільнювача детонації. За погодженням з геологічною службою замовника роботи проводилися в горизонті В-22 однією торпедою з двох зарядів однакової маси з додатковою перфорацією щільністю 6 отв./хв. Результат - збільшення дебіту свердловини у 2,0 рази ($\beta=2$).

Свердловина працювала з підвищеним дебітом (>10 тис. м³/добу) 4,5 роки. У розрахунку використовувалися такі значення параметрів: $r_0 = 0,3$ та $0,4$ м (визначені розмірами перфораційних отворів); $R_{in} = 200$ м, 500 м і 1000 м. $R_0 = 0,08$ м (зосереджений) та $R_0 = 0,029$ м (подовжений) (близькі до реальних радіусів зарядів). Розрахунки за формулами (1), (2) наведені у таблиці.

Таблиця 1 - Параметри хвилі напруги в ГП від вибуху зосередженого та подовженого зарядів

r , м	1	2	3	4	5	6
σ_r , МПа*	133,0	39,0	19,2	11,6	8,1	5,66
σ_r , МПа**	105,7	45,3	28,7	20,4	15,7	12,6

* зосереджений заряд; ** подовжений заряд

Розрахунок за формулою (3) дає такі значення ефективного радіусу свердловини R_{ef} після обробки для різних значень радіусу впливу свердловини: $R_{ef}=7,7-8,9$ м; $R_{ef}=12,2-14,1$ м; $R_{ef}=17,3-20,1$ м для $R_{in} = 200$, 500 м та 1000 м. Результати розрахунків та результати робіт у свердловинах можна узагальнити у таких положеннях. При вибуху одиночних зарядів у монолітних і слаботріщинуватих породах хвиля стиснення не може бути причиною розміщення ГП у зоні радіальних тріщин і за її межами, оскільки амплітуда хвиль співрівняна з міцністю на стиск, чи менше її. Руйнування ГП стисненням можливе при досягненні рівня напруги, в порівнянні з модулем зсуву. Результати розрахунку тиску за фронтом хвилі стиснення від вибуху зосередженого та подовженого зарядів підтверджують відомі факти. За відсутності гірського тиску розміщення ГП в зоні радіальних тріщин і за її межами відбувається у фазі розтягувальних кільцевих напруг σ_θ , починаючи з відстаней $\sim(14...20)r_0$ з подальшим розвитком під дією продуктів детонації [10, 11]. За наявності гірського тиску, починаючи з глибин залягання $\approx 300-500$ м і більше, при вибуху одиночних зарядів, умови для утворення тріщин або зміни розмірів відсутні, оскільки $\sigma_\theta > \sigma_p + q_\infty - p_{pl}$. не виконується ($\sigma_p, q_\infty, p_{pl}$ – міцність ГП на розтяг, гірський тиск та пластовий тиск). Міцність σ_p визначається з експерименту або за формулами механіки руйнування для тріщини даного розміру. Однак розрахунок за формулою (3) показує, що зміна проникності породи-колектора відбулася на відстані до $7...8$ м. Причому згідно з [1] проникність ДП у кожній точці цієї зони більша, ніж проникність поза цією зоною. Одним з можливих пояснень підвищення проникності ДП на значних відстанях від свердловини є результат кооперативних ефектів від дії вибуху, розвиток макротріщин і мікротріщин при зниженні тиску в свердловині в процесі освоєння та впливу пластових газів. У разі дії гірського тиску зміна структури ГП при динамічних і повільних квазістатичних навантаженнях відбувається під впливом зсувних напруг. Критична величина напруг зсуву для ініціювання цих змін в межах $1\div 10$ МПа. Величина зсувних напруг визначається різницею найбільшого та найменшого нормальних напруг. В даному способі підвищення продуктивності роботи свердловин закладено принцип суперпозиції вибухових хвиль від сусідніх зарядів для забезпечення в деякій просторово-часовій області пласта умов $\tau = \max$ [1]. Зсувні динамічні напруги призводять до розміщення ГП по дилатансійному механізму [1], або змінюють структуру ГП шляхом локального руйнування, змінюючи розміри наявних мікро- та макротріщин у ГП [11].

При статичних навантаженнях зсувні напруги в пружній ГП в межах свердловини з відкритим стволом описуються простою формулою (4) [20]:

$$\tau = (q_\infty - p_h)(r_c / r)^2 \quad (4)$$

З формули (4) випливає висновок, що при зменшенні гідростатичного тиску в свердловині p_h величина зсувних напруг на контурі свердловини збільшується. За певного її значення вона може досягти межі міцності ГП на зсув з утворенням макротріщин. Наприклад, для пісковика з межею міцності на зсув $65 \dots 70$ МПа стан граничної рівноваги настає при $p_h = 6-10$ МПа для глибини залягання пласта $H = 3000$ м і $p_h = 8-20$ МПа для $H = 4000$ м. При подальшому зменшенні p_h відбувається локальне руйнування ГП на стінці свердловини.

Одним із суттєвих факторів, що впливає на структуру ГП та її проникність, є газовий фактор. Наявність у складі нафтових та пластових газів високопроникних компонентів, зокрема водню та гелію, сприяє зміні структури та підвищенню проникності монолітних та малотріщинуватих ГП [17, 21, 22]. Таким чином, проведений аналіз показує, що нелінійні ефекти підвищення проникності ГП та підвищення продуктивності роботи свердловини при малоенергетичних впливах – це результат дії вибухових хвиль, або інших фізичних полів при інших видах впливу, пластових флюїдів та гірничого тиску. Про це свідчить поступова в часі зміна продуктивності роботи свердловини, що спостерігалось при освоєнні свердловин № 612 Мамонтовського родовища нафти [23], № 104 Анастасівського родовища нафти та газу (рис. 1, криві 1, 2), № 2 Суходолівського родовища нафти (рис. 1, крива 3). Час виходу перших двох свердловин на максимальну продуктивність – приблизно три місяці, третьої свердловини – приблизно один місяць. Час виходу газових та газоконденсатних свердловин на максимальну продуктивність набагато менший [1, 7, 23]. Для двох газових свердловин (№ 42 Талалаєвська та №15284 Уренгойська) цей час склав не більше 2÷3 днів, включаючи час спуску насосно-компресорних труб та освоєння свердловини. Очевидно, це пов'язано з більшим запасом внутрішньої енергії у газовому пласті. Відповідно до [24] для глибин 2-3 км питома енергія стисненого скелета породи-колектора та ізотермічно стисненого нагрітого газу становить відповідно 0,12...0,28 МДж/м³ та 0,725 МДж/м³ для пластового тиску та температури $T_{пл} = 373^{\circ} \text{K}$; $p_{пл} = 3 \cdot 10^7 \text{ Па}$. Питома енергія стиснення пластової рідини (нафти) за такого тиску оцінюється у 0,037...0,05 МДж/м³. Кооперативним ефектам властиво впливати на руйнування та рух кольматантів у поровому просторі. При цьому, чим більше факторів, що діють спільно на ГП та відкладення у поровому й тріщинному просторі, тим інтенсивніше відбуваються процеси деструкції і виносу кольматантів у свердловину [25]. Час переходу системи «пласт - свердловина» з одного енергетичного стану в інший найвирогідніше є константою, яка залежить від величини внутрішньої енергії та енергії, закачаної в систему ззовні (потужності вибуху та величини депресії на пласт). З теоретичної точки зору сучасної термодинаміки перехід системи «свердловина-пласт» з одного термодинамічного стану до іншого відбувається з утворенням диссипативних структур у пласті та зміною визначальних параметрів. В даному випадку – це мікро- та макроруйнування в пласті. Визначальними параметрами є тиск і температура у пласті та на вибої свердловини. Відповідно механічна робота у цих переходах перетворюється на тепло.

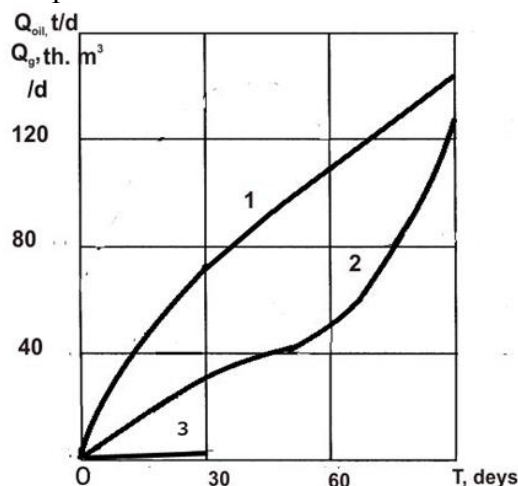


Рисунок 1 – Зміна дебітів свердловин № 104 (Анастасівська) і № 2 (Суходолівська) по нафті (криві 1, 3) і по газу (св. № 104, крива 2)

Отже, за наведеними прикладами інформація, що підтверджує сформульований механізм розміщення ГП у пластових умовах, не вичерпується. Ці експериментальні дані частково викладено в роботах [1, 7, 23, 24], а також в інших роботах Михалюка А.В. та Нагорного В.П.

ВИСНОВКИ та практичне значення

У результаті проведеного аналізу, в умовах промислових випробувань вибухової технології – інтенсифікації, а також на основі розрахунків згасання та стиснення хвильових амплітуд досліджено, що в умовах дії гірського тиску спостерігаються характерні структурні зміни у ГП, що обумовлено результатом вибуху кількох зарядів, які відбувається на відстані до $\approx (80 \dots 100) R_0$. У пластових умовах основною причиною появи таких протяжних зон підвищеної проникності навколо свердловини є кооперативні ефекти від спільної дії вибухових хвиль, пластових газів (метан, діоксид вуглецю, гелій і, можливо, водень), а також зміна гірського тиску в пласті при зниженні рівня рідини свердловини у процесі її освоєння. Це призводить до зміни напружено-деформованого стану ГП навколо свердловини, що ініціює локальне руйнування ГП в осередках мікроруйнування та перфораційних отворах. Час переходу системи «свердловина – пласт» з одного термодинамічного стану в інший визначається внутрішньою енергією пласта.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. В. Михалюк, *Дилатансия и ее влияние на свойства горных пород при допределельных динамических нагрузках*. Киев: Випол, 2001.
- [2] В. И. Карев, "Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на фильтрационный процесс и дебит скважин", автореф. дис. д-ра техн. наук: ИПМаш РАН., Санкт-Петербург, 2010.
- [3] S. N. Stovpnik, "Features of post-limit deformation of rocks in the Donetsk coal basin", *Sovlet Mining Science*, New York: Springer, vol. 27 (3), pp. 176–179, 1991.
- [4] О. Е. Хоменко, "Энергетический метод исследования зональной дезинтеграции горных пород", *Науковий вісник НГУ*, №4, с. 44–54, 2012.
http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2012_4_10
- [5] Инструкция по выбору способа и параметров разупрочнения кровли на выемочных участках. Министерство угольной промышленности СССР, Л.: ВНИМИ, с. 95, 1991.
<https://docs.cntd.ru/document/1200080219>
- [6] О. О. Фролов, В. З. Ващук, В. Т. Моденко, та А. В. Куляпіна, "Встановлення закономірностей руйнування гірських порід вибухом свердловинних зарядів зі сповільненням", *Вісник Національного технічного університету "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво"*, № 32, с. 44 – 51, 2017.
<https://doi.org/10.20535/2079-5688.2017.32.93983>
- [7] Ю. И. Войтенко, Н. А. Лысюк, В. И. Красько, & Л. А. Митюк, "Взрывные и импульсные методы интенсификации добычи нефти и газа и опыт их использования на месторождениях Украины и России", *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 2, с. 47–53, 2002.
- [8] А. А. Пешков, Н. А. Мацко, А. Г. Михайлов, та В. И. Брагин, "Перспективные горные мегатехнологии", *Екологія і природокористування*, №8, с. 90-94, 2005.
- [9] К. Н. Кошколда, Н. Н. Чесноков, Ю. И Войтенко, & другие, *Способы подготовки рудных залежей и интенсификации технологических процессов подземного выщелачивания*. Москва: Энергоатомиздат, 1986.
- [10] А. Н. Одинцов, та В. Н. Кочанов, "Волновое предразрушение монолитных горных пород при взрыве", *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 6, с. 38 – 48, 2016.
- [11] Ю. И. Войтенко, та К. Н. Ткачук, "Об изменении свойств геофизической среды при подземных взрывах", *Физико - технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 3, с. 45-50, 1999.
- [12] А. М. Лексовский, В. А. Боровиков, Н. С. Бозоров, А. А. Абдуманонов, А. Б. Синани, та С. А. Пилецки, "Зона поврежденности высокомодульных материалов при взрывном нагружении гранита", *Письма в ЖТФ*, т. 28, вып. 16, с. 90-94, 2002.
<http://j.ioffe.ru/articles/viewPDF/40545>.
- [13] Г. Г. Юревич, та В. Д. Трофимов, *Горная геомеханика глубинных взрывов*. Москва: Недра, 1980.
- [14] Ю. С. Мец, "Интенсификация взрывного дробления и разуплотнения железистых кварцитов", *Взрывное дело*, №86/43, с. 81 – 95, 1984.

- [15] B. N. Cox, H. Gao, D. Gross, & D. Rittel, "Modern topics and challenges in dynamic fracture", *Journal of the Mechanics and Physics of solids*, vol. 53, №3, pp. 565-596, 2005. https://rittel.group/wp-content/uploads/2020/12/dynamic_fracture.pdf
- [16] O. Terentiev, & P. Gontar, "Rocks fracturing with explosive-mechanical means", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*, вип. 28, с. 71-76, 2014.
- [17] Ю. И. Войтенко, В. Г. Кравець, та В. В. Коробийчук, "О синергетике поведения горных пород в условиях горного и пластового давления", *Технічна інженерія*, № 2 (86), с. 150-161, 2020. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-150-161](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-150-161).
- [18] М. М. Павлов, "Максимальные массовые скорости в волне при взрыве цилиндрических зарядов в горных породах", *Физика горения и взрыва*, № 3, с. 125-128, 1981.
- [19] A. I. Kriuchkov, & A. I. Bakhtyn, "An analytical description of the impulse of tension in the rock massif and its experimental confirmation in the blasting of quarries", *Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna Materialy mizhn*, Conf. [materials international conf.], Kyiv, May 15-17, 2015, pp. 34-36.
- [20] Ю. І. Войтенко, "Про значення геомеханіки в нафтогазовій геології та процесах розкриття продуктивних горизонтів", *Мінеральні ресурси України*, №1, с. 52-55, 2017. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mru_2017_1_10
- [21] А. Е. Лукин, "Дегазация земли, нефтегенез и нефтегазоносность", *Збірник наукових праць УкрДГРІ*, № 3, с. 142-164, 2017.
- [22] О. В. Кравченко, "Водородная активация в процессах повышения проницаемости нефтегазовых пород", *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, вып. 1/6 (61), с. 21-25, 2013.
- [23] А. В. Михалюк, Е. А. Мухин, С. А. Михалюк, та В. В. Захаров, *Дилатансионные технологии торпедирования скважин для интенсификации добычи подземных флюидов*. Киев: ВИПОЛ, 1999.
- [24] Ю. І. Войтенко, "Синергетична природа поведінки нафтогазового пласта та її вплив на ефективність розкриття й інтенсифікації припливу", *Мінеральні ресурси України*, №3, с. 33-36, 2019. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.3.33-36>
- [25] V. A. Prokopenko, I. G. Kovzun, Z. R. Ulberg, O. A. Tsiganovich, & A. V. Panko, "Physicochemical geomechanic and nanochemical processes in natural and technogenic minerals", *Visn. National Academy of Sciences of Ukraine*, № 2, pp. 83-96, 2018. <https://doi.org/10.15407/visn2018.02.083>

Yu. Voitenko Dr. Eng. Sc., Lead. Res.

ORCID: 0000-0003-3077-2207

Institute of Hydromechanics of NASU, Kyiv, Ukraine

V. Vapnichna* Cand. Eng. Sc., Assoc. Prof.,

ORCID: 0000-0003-3938-4358

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Kyiv, Ukraine

O.Voitenko, Cand. Chem. Sc. Scientific Secretary

Ovcharenko Institute of Biocolloidall chemistry of NASU, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: v.vapnichna@kpi.ua

Received 12.05.2022; Accepted 13.06.2022

ON THE DESTRUCTION AND PREFRACTURING OF SOLID ROCKS UNDER BLASTING IN FORMATION CONDITIONS

Purpose and task. Analysis and specification of mechanisms of softening and change of structure of monolithic and low-fractured rocks under blasting of single and dispersed charges, definition of the reasons and model of their evolution in a formation. To solve this goal, the following scientific tasks were set in the work:

1. Estimation of force factors of external action on rock.

2. Thermodynamic analysis and detection of mechanisms of structural changes in rocks at a considerable distance from the well, which provide a change in its productivity.

Research methods. To solve the set tasks, the following were performed: calculations of the attenuation of shock wave amplitudes generated during the explosion of spherical and elongated charges; analysis of the results of explosive treatments of oil and gas wells; energy analysis of processes and mechanisms of changes that occur around the well in the reservoir.

The main results. Studies have shown that structural changes in rocks during low-energy explosions, as well as other low-energy methods of external action on the reservoir occur in the form of increased cracking of rocks at micro and macro levels due to cooperative effects of external action, internal reservoir energy and physico-chemical effects of reservoir fluids.

The main results. The mechanisms of decompaction of the rocks in rock formation conditions in the presence of rock and reservoir pressure at low-energy external actions are considered. Experiments on the operation of oil, oil and gas and gas wells show that the transition of the system "well - formation" from one thermodynamic state to another occurs in a time that depends on the internal energy of the formation. The transition is the result of the cooperative effects of the combined action of external influences, the internal energy of the formation and rock pressure. For gas wells this time does not exceed a few hours or days, for oil and oil and gas with depths of 3000... 4000 m the typical time of the well to reach maximum productivity is \approx (30 - 90) days.

Conclusions and practical significance. The analysis of the results of industrial tests of explosive intensification technology and calculations of attenuation of compression wave amplitudes show that under rock pressure conditions structural changes in rock after explosions of several charges occur at distances up to \approx (80... 100) R_0 . Under reservoir conditions, the main reasons for the appearance of such long zones of increased permeability around the well are the cooperative effects of the combined action of blast waves, reservoir gases (methane, carbon dioxide, helium and possibly hydrogen), as well as changes in rock pressure in the process of its development. Of practical importance is to understand the sequence of technological operations in the work to intensify the inflow of oil and gas.

Keywords: decompaction of the rock; destruction; external influence; cooperative effects; rock pressure; dissipative structures.

REFERENCES

- [1] A. V. Mikhalyuk, *Dylatansii i ee vliianie na svoystva gornykh porod pri dopredelnykh dinamicheskikh nagryzkakh*. Kiev: Vipol, 2001.
- [2] V. I. Karev, "Vliianie napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia gornykh porod na filtratsionnyi protsess i debit skvazhin", avtoref. dis. dok. tekhn. nauk, IPMash RAS, St. Petersburg, 2010.
- [3] S. N. Stovpnik, "Features of post-limit deformation of rocks in the Donetsk coal basin", *Sovlet Mining Science*, New York: Springer, vol. 27 (3), pp. 176–179, 1991.
- [4] O. Ye. Khomenko, "Energeticheskii metod issledovaniia zonalnoy dezintegratsii gornykh porod", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no 4, pp. 44–54, 2012. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2012_4_10.
- [5] *Instryktsiia po vubory sposoba i parametrov razpyrochneniia krovli na vuemochnykh ychastkakh*. Ministerstvo ygolnoy promyshlennosti USSR, L.: VNIMI, pp. 95, 1991. <https://docs.cntd.ru/document/1200080219>
- [6] O. O. Frolov, V. Z. Vashchuk, V. T. Modenko, & A. V. Kuliapina, "Vstanovlennia zakonmirnostey ruiynuvannia girskukh pored vubykhom sverdlouunnukh zariadiv z spovilnenniam", *Visnyk Natsionalnogo technichnogo universitetu "Kuivskuy politekhnichnuy institut"*. *Seriia "Girnutstvo"*, no 32, pp. 44 – 51, 2017. <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2017.32.93983>
- [7] Yu. I. Voitenko, N. A. Lysyuk, V. I. Kras'ko, & L. A. Mityuk, "Vzruvnue i impulsue metodu intensifikatsii dobuchi nefi i gaza i oput ikh ispolzovaniia na mestorozhdeniakh Ukrainu i Rosii", *Fiziko-tekhnicheskie problemu razrabotki poleznukh iskopaemukh*, no 2, pp. 47–53, 2002.
- [8] A. A. Peshkov, N. A. Matsko, A. G. Mikhailov, & V. I. Bragin, "Perspektivnue gornue megatekhnologii", *Ekologiiia i prurodokorustyvannia*, no 8, pp. 90-94, 2005.

- [9] K. N. Koshkolda, N. N. Chesnokov, Yu. I. Voitenko, & et al., *Sposobu podgotovki rudnykh zalezhey i intensivatsii technologicheskikh protsessov podzemnogo vusfhelachivaniia*. Moskva: Energoatomizdat, 1986.
- [10] A. N. Odintsev, & V. N. Kochanov, "Volnovoe predrazrushenie monolitnykh gornykh porod pri vzruve", *Fiziko-tehnicheskie problemu razrabotki poleznykh iskopaemukh*, no 6, pp. 38 – 48, 2016.
- [11] Yu. I. Voitenko, & K. N. Tkachuk, "Ob izmenenii svoystv geofizicheskoy sredy pri podzemnykh vzruvakh", *Fiziko-tehnicheskie problemu razrabotki poleznykh iskopaemukh*, no 3, pp. 45-50, 1999.
- [12] A. M. Leksowskij, V. A. Borovikov, N. S. Bozorov, A. A. Abdumanonov, A. B. Sinani, & S. A. Piletski, "Zona povrezhdennosti vusokomodolnykh materialov pri vzruvnom nagryzhenii granita", *Pisma v ZHTF*, vol. 28, no. 16, pp. 90-94, 2002.
<http://j.ioffe.ru/articles/viewPDF/40545>
- [13] G. G. Yurevich, & V. D. Trofimov, *Gornaia geomekhanika glybinnukh vzruvov*. Moskva: Nedra, 1980.
- [14] Yu. S. Mets, "Intensifikatsiia vzruvnogo drobleniia i razplotneniia zhelezistukh kvartsitov", *Vzruvnoe delo*, no. 86/43, pp. 81 – 95, 1984.
- [15] B. N. Cox, H. Gao, D. Gross, & D. Rittel, "Modern topics and challenges in dynamic fracture", *Journal of the Mechanics and Physics of solids*, vol. 53, no. 3, pp. 565-596, 2005.
https://rittel.group/wp-content/uploads/2020/12/dynamic_fracture.pdf
- [16] O. Terentiev, & P. Gontar, "Rocks fracturing with explosive-mechanical means", *Visnik Natsionalnogo technichnogo universitetu "Kuivskuy politekhnichmuy institut". Seriiia "Girnutstvo"*, no. 28, pp. 71-76, 2014.
- [17] Yu. I. Voitenko, V. G. Kravets, & V. V. Korobiichuk, "O sunergetike povedeniia gornykh porod v ysvoviiakh gornogo i plastovogo davleniia", *Tekhnichna inzheneriia*, no 2 (86), pp. 150-161, 2020. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-150-161](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-150-161)
- [18] M. M. Pavlov, "Maksimalnue massovue skorosti v volne pri vzruve tsilindricheskikh zariadov v gornykh porodakh", *Fizika gorenii i vzruva*, no 3, pp.125-128, 1981.
- [19] A. I. Kriuchkov, & A. I. Bakhtyn, "An analytical description of the impulse of tension in the rock massif and its experimental confirmation in the blasting of quarries", *Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna Materialy mizhn*, Conf. [materials international conf.], Kyiv, May 15-17, 2015, pp. 34–36.
- [20] Yu. I. Voitenko, "Pro znachennia geomekhaniku v naftogazoviy geologii ta protsesakh rozkruttia prodyktivnykh goruzontiv", *Mineralni resursy Ukrainu*, no 1, pp. 52-55, 2017.
http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mru_2017_1_10
- [21] A. E. Lukin, "Degazatsiia zemli, naftidogenez i neftegazonosnost'", *Zbirnyk naykovukh prath' UkrDGRII*, no 3, pp. 142-164, 2017.
- [22] O. V. Kravchenko, "Vodorodnaia aktivatsiia v protsesakh povusheniia pronitsaemosti neftegazovukh porod", *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, no. 1/6 (61), pp. 21-25, 2013.
- [23] A. V. Mikhalyuk, E. A. Mukhin, S. A. Mikhalyuk, & V. V. Zakharov, *Dulatansionnue tekhnologii torpedirovaniia skvazhin dlia intensivatsii dobuchi podzemnykh fliuidov*. Kiev: Vipol, 1999.
- [24] Yu. I. Voitenko, "Sunergetuchna pruroda povedinku naftogazovogo plasta ta ii vpluv na efektuvnist' rozkruttia y intensivatsii prupluyvy", *Mineralni resursy Ukrainu*, no. 3, pp. 33-36, 2019. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.3.33-36>
- [25] V. A. Prokopenko, I. G. Kovzun, Z. R. Ulberg, O. A. Tsiganovich, & A. V. Panko, "Physicochemical geomechanic and nanochemical processes in natural and technogenic minerals", *Visn. National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 2, pp. 83-96, 2018.
<https://doi.org/10.15407/visn2018.02.083>