

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.023.001.57

DOI https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/27

Рязанцев М.О.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Носач О.К.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Рязанцев А.М.

Красноармійський завод промислового обладнання

ПРИЧИНИ ТА МЕХАНІЗМ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Мета. Основною метою роботи є встановлення причин і розроблення деформаційного передвісника руйнування гірських порід.

Методика. В роботі наведено лабораторні експериментальні дані щодо деформування та руйнування гірських порід в об'ємному напруженому стані на установці нерівнокомпонентного об'ємного стискання конструкції Донецького фізико-технічного інституту Національної академії наук України (далі – ДонФТІ НАН України). Проаналізовано умови виникнення резонансних явищ за деформування та руйнування гірських порід.

Результати. Показано, що гірські породи є класичними ауксетиками, в яких пружні показники в процесі механічного навантаження змінюють величину та знак. Характерні деформації, за яких пружні характеристики змінюють свою величину, є квантованими й постійними для всіх матеріалів. Показано, що приріст деформацій є знакоперемінним, що підкреслює хвильовий характер деформації. В процесі деформації виділено чотири характерних етапи, притаманних усім породам незалежно від виду напруженого стану й величини всестороннього тиску. Передвісником руйнування є резонансне зростання амплітуди приросту лінійних і зсувних деформацій на третьому етапі внаслідок подвійного вихро-хвильового резонансу по швидкості, розмірах структур і частоті. У разі зрівняння за величиною модулів зсуву й об'ємного стискання (швидкості власного коливання часток породи та швидкості звуку в середовищі) виникає ударна хвиля й динамічне руйнування. За відсутності резонансу по швидкості спостерігається «повільна» течія.

Наукова новизна. Вперше показано, що пружні характеристики гірських порід не є константами матеріалу, а є структурно чутливими характеристиками опору деформації, що змінюються за величиною й за знаком під час механічного навантаження; зсувні деформації мають ротаційний характер. У процесі деформування гірських порід спостерігаються чотири характерних етапи. З точки зору руйнування найбільш цікавим є третій етап – резонансне зростання приросту максимальної, мінімальної та зсувної деформації. Коли модуль об'ємного стискання дорівнює модулю зсуву, виникає антирезонанс й ударна хвиля. Без ударної хвилі матеріал просто тече.

Практичне значення – резонансне зростання амплітуди приросту максимальної, мінімальної та зсувної деформації є критерієм руйнування взагалі й динамічного руйнування зокрема, що на практиці може використовуватися як передвісник або прогнозний критерій руйнування.

Ключові слова: приріст деформації, пружні модулі, спірально-вихрова хвиля, антирезонанс, руйнування.

Постановка проблеми. Історично так скла-лося, що проблема передбачення руйнування матеріалів взагалі й гірських порід зокрема вирішувалася шляхом створення так званих теорій міцності. Відсутність загальноновизнаних достовірних і надійних критеріїв і передвісників руй-

нування свідчить про те, що шлях цей виявився тупиковим, проблема й досі залишається актуальною. Традиційні способи інтерпретації експериментальних даних, отриманих під час випробувань гірських порід на міцність, у вигляді діаграм «напруження – деформація» себе вичерпали,

тому основною метою досліджень є пошук причин і передвісників руйнування гірських порід в умовах об'ємного нерівнокомпонентного стискання з урахуванням того, що обмін енергією між об'єктами взаємодії має хвильовий характер, що всі структурні елементи планети (шари та блоки різних масштабних рівнів) є резонаторами.

Основною ідеєю досліджень є вивчення змін амплітуди приросту деформацій і величини пружних параметрів у процесі механічного навантаження. Тому науково-дослідні завдання полягали в проведенні лабораторних експериментів з випробування гірських порід в умовах нерівнокомпонентного об'ємного стискання з фіксацією в процесі навантаження приросту навантаження по трьох осях, а також амплітуди приросту лінійних, зсувних і об'ємних деформацій. Оскільки відношення приросту напружень до приросту деформацій має фізичний сенс пружних модулів, наступним завданням є аналіз їх змін у процесі навантаження. Крім лабораторних експериментів і нетрадиційного представлення їхніх результатів, завданням є аналіз сучасних уявлень про резонансні явища в гірському масиві, оскільки в авторів виникла впевненість, що основною причиною руйнування гірських порід є резонанс. Тому логіка подання дослідницького матеріалу полягає в тому, що спочатку викладається короткий огляд сучасних уявлень про резонансні явища, а потім отриманий експериментальний матеріал, що підтверджує резонансну причину руйнування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з останніми теоретичними й експериментальними даними обмін енергією між об'єктами взаємодії має хвильовий характер [1, с. 10; 2, с. 95; 3, с. 101; 4, с. 124; 5, с. 3]. Всі структурні елементи планети Земля (гірські шари та блоки різних масштабних рівнів) є резонаторами, для яких збуджувальним джерелом коливань є комплексне Всесвітнє джерело хвильової енергії з періодом $T = 160$ хв (частота $f = 0,104$ МГц), яке складається з реактивної складової, що входить в Землю ортогонально її поверхні з усіх боків, і активної спіральньо-вихрової складової. Реактивна складова обумовлює зміну об'єму й викликає пульсацію і сфероїдальні коливання Землі та всіх її структурних елементів. Спіральньо-вихрова складова викликає обертання планети й тороїдальні коливання (поперечні до реактивної складової).

Спіральньо-вихрова хвиля, що виникає в резонаторі, може бути поляризована лінійно або по колу в залежності від умов збудження хвильового поля, наявності меж і їхніх характеристик.

Напрямок поляризації може змінюватися на протилежний через характерний просторовий розмір хвильового поля. В місцях такої зміни спостерігається лінійна поляризація. З цих міркувань площину екліптики можна вважати величезною площиною поляризації, де й відбувається рух планет Сонячної Системи по еліптичних орбітах (рис. 1). Орбіти зовнішніх планет кратні діаметру Сонця й довжині хвилі [6, с. 48].

Якщо погодитися з резонансною структурою Сонячної системи з планетами-резонаторами, то резонансний період їхніх коливань можна знайти, прирівнюючи відцентрову силу обертального (вихрового) руху й силу гравітації [2, с. 98]:

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{\gamma M}}, \quad (1)$$

де R – радіус планети; T_n – період її коливань як нульового джерела хвильових процесів; M – маса планети, γ – гравітаційна константа.

За резонансу в Сонячній системі довжина резонуючого ланцюга становить:

$$L_{cn} = n\lambda/4, \quad (2)$$

де $\lambda = 46,32$ млн км – довжина хвилі, що поширюється в площині поляризації (площині екліптики); L_{cn} – відстань планети від Сонця, для Землі $L_{cn} = 149,5 \dots 150,15$ млн км; $n = 1, 3, 5, 7$ і так далі – непарні гармоніки (резонанс на поперечних хвилях відбувається тільки на непарних гармоніках). Для Землі $n = 13$. Період цієї гармоніки $T_{13} = 4$ доби. Це так званий *резонанс третього роду або спінобарицентричний резонанс* [7], коли кожна планета обертається навколо Сонця, а разом з ним – навколо барицентру Сонячної системи. Рух кожної планети передається через Сонце-ретранслятор іншим планетам, і всі фізичні процеси синхронізуються. Цей резонанс відбивається в гірському масиві характерними сплесками кількості акустичних імпульсів, які повторюються точно через 4 доби (рис. 2).

Разом з резонансом третього роду присутній також *орбітальний резонанс або резонанс другого роду* [8], коли періоди обертання сусідніх космічних об'єктів по орбітах кратні один одному (Земля – Венера 8:5, Сатурн – Юпітер 2:3). Часто ці резонанси супроводжуються також *спінспіновими резонансами*, коли періоди обертання навколо власних осей також синхронізуються й космічні об'єкти повернуті один до одного одним боком (Земля – Місяць 1:1, Юпітер – Європа 1:1,

Земля – Венера за протистояння). У всіх космічних об'єктів є так званий *спін-орбитальний резонанс*, або *резонанс першого роду*, коли період обертання по орбіті кратний періоду обертання навколо власної осі (для Землі $T_{орб} = 366T_{об}$, для Меркурія $T_{орб} = \frac{3}{2}T_{об}$).

Оскільки всі космічні об'єкти пульсують на одній частоті $T_n = 160$ хв., слід відзначити появу *пульсаційно-спінного резонансу*, або (по аналогії з попередніми) *резонансу нульового роду*, коли період обертання космічного об'єкта навколо власної осі кратний періоду пульсації (для Землі $T_{об} = 9T_n$).

Як показано в [2, с. 98], для випадку пульсації поверхні планети як хвильового джерела нульового порядку співвідношення

$$\frac{R^3}{MT_n^2} = \text{const} \text{ і } \frac{R^3}{MT_{орб}^2} = \text{const}, \quad (3)$$

де R – радіус планети; M – її маса; $T_n = 160$ хв – період пульсації поверхні планети, постійний для

всіх об'єктів сонячної системи; $T_{орб}$ – період обертання планети.

Періоди коливань поверхонь планет як джерела коливань нульового порядку й періоди їх обертання навколо осей пов'язані між собою співвідношенням:

$$T_{орб} = nT_n, \quad (4)$$

де n – порядок гармоніки, за якого період обертання навколо осі резонує з періодом пульсації. Для Землі $n = 9$, $T_{орб} = 160 \cdot 9 = 1440$ хв. = 24 год. Це і є так званий пульсаційно-спінний резонанс.

Для всіх дискретних систем макро- і мікро-рівнів запропонована універсальна хвильова константа [2, с. 97]:

$$K = \frac{4\pi^2 R^3}{MT_n^2} = \frac{3\pi}{\rho T^2} = \gamma, \quad (5)$$

де ρ – щільність планети-резонатора, для Землі середня щільність $\rho = 5520$ кг/м³; γ – постійна гравітації, $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11}$ м³/кг*с².

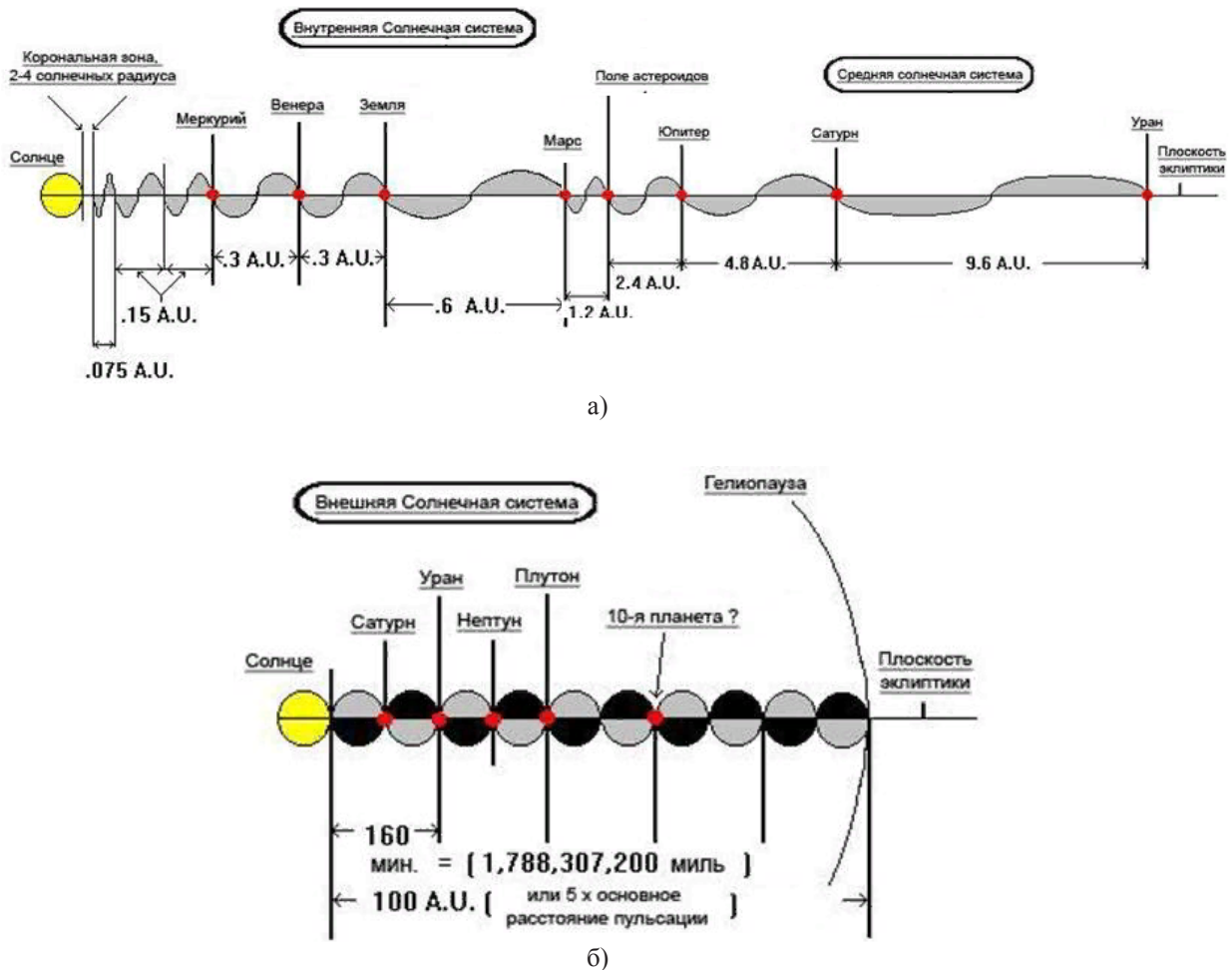


Рис. 1. Резонанс Стоункінга, що впливає на розташування планет: а – внутрішня й середня Сонячна система, показано тільки хвилю розширення (планети розташовані у вузлах); б- зовнішня Сонячна система: – хвиля стискування; – хвиля розширення

Для Землі як гравітаційного резонатора в стійкому стані можна записати:

$$3\neq/\gamma = \rho T_3^2 = \text{const.}$$

Тут T_3 – період основного власного коливання Землі як гравітаційного резонатора. Для Землі як твердої кулі отримаємо $T_3 = 5058,1 \text{ с} = 84,38 \text{ хв}$.

Середня швидкість поширення пульсації в надрах Землі становитиме:

$$V_p = \frac{2D}{T_3} = 2 \cdot 12700 / 84,38 \cdot 60 = 5,02 \text{ км/с.}$$

Середня швидкість поширення поперечної хвилі в надрах Землі становитиме:

$$V_s = \frac{D}{T_n} = 12700 / 84,38 \cdot 60 = 2,51 \text{ км/с.}$$

Як бачимо, періоди хвиль пульсації й тороїдальних коливань збігаються, що свідчить про їхню синхронність і синфазність. В загальному випадку вони поширюються разом. Діаметр земної кулі як космічного об'єкта з атмосферою й усіма її іншими оболонками (рис. 3) може бути визначений через нульовий період пульсації $T_0 = 160 \text{ хв}$ і становить $D_0 = 24096 \text{ км}$.

Як показано в [9, с. 59; 10, с. 48], спіральновихрове поле, що надходить від Сонця, на Землі під час взаємодії з її речовиною модулюється низькими частотами власних гравітаційних коливань (рис. 4), утворює сферичні або тороїдальні солітони, і в цих формах під впливом фонового спіральновихвильового поля рухається з перемінними швидкостями і по перемінних напрямках.

В надрах Землі хвильова взаємодія з будь-яким шаром-резонатором також розпадається на два рухи: активний вихровий рух і реактивний пульсуючий. Шар або блок – резонатор розглядається як вторинний випромінювач (випромінює поперечні власні коливання). Загальна енергія джерело-резонатор залежить від амплітуд і фаз коливань, які є функціями збуджувальної частоти й параметрів самого резонатора. Система джерело – резонатор є системою з одним ступенем свободи, яка має одну резонансну й одну антирезонансну частоту.

Як показано в [11, с. 295], резонанс спостерігається лише на реактивній складовій, яку можна інтерпретувати як кульовий тензор деформацій (за всіма напрямками), що діє ортогонально поверхні, є півхвильовим, відбувається на всіх гармоніках і характеризується повним пропусканням хвилі від джерела без віддзеркалення й поглинання. Це явище отримало назву ефекту монохроматора.

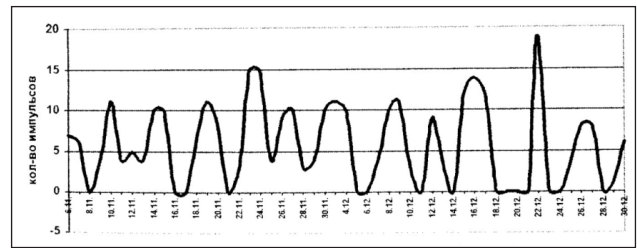


Рис. 2. Зміни кількості акустичних імпульсів у часі в 1-му північному конвеєрному штреку блока № 3 ПрАТ «ШУ «Покровське»

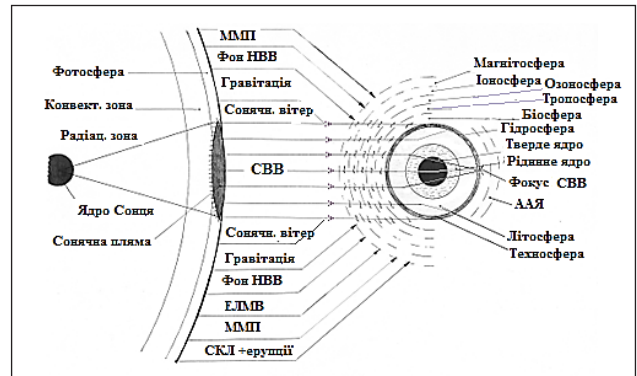


Рис. 3. Схема формування спрямованого потоку спіральновихвильового випромінювання (СВВ) з великої сонячної плями

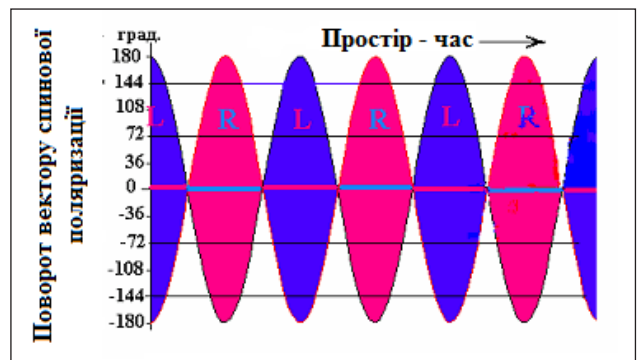


Рис. 4. Модуляційна складова вихрового поля за його 100% модуляції власними коливаннями низької частоти

Антирезонанс спостерігається тільки на активній (вихрово-поперечній) складовій, є хвильовим, відбувається тільки на непарних гармоніках і характеризується частковим віддзеркаленням від меж розподілу шарів і перетворенням решти енергії на власні поперечні коливання шару-резонатора, які поширюються вздовж меж шару, не виходячи за ці межі. Явище антирезонансу отримало назву ефекту акустичного резонансного поглинання.

За резонансу первинне хвильове поле посилюється, за антирезонансу – послаблюється, але суттєво зростає амплітуда власних спіральновихвильових коливань шару або блока-резонатора.

Резонансна частота пов'язана з характерним розміром об'єкта-резонатора:

$$f_{\text{мх}} = \frac{V_p}{2\ell} n, \quad (6)$$

де V_p – швидкість поздовжньої складової об'ємної хвилі; ℓ – характерний розмір шару, блока (для шару – товщина); n – порядок гармоніки.

Антирезонансна частота визначається таким чином:

$$f_o = \frac{V_s}{\ell} n, \quad (7)$$

де V_s – швидкість поперечної складової об'ємної хвилі.

Для систем з багатьма ступенями свободи виникає ряд резонансних і ряд антирезонансних частот.

Для зон посилення й послаблення, що чергуються, за одночасної дії активного й пасивного (резонатора) випромінювачів значення сумарного потенціалу має вигляд [12, с. 172]:

$$\phi = \phi_1 \left[1 + \frac{\rho\omega S^2}{iZ(\omega)4\pi d} \right], \quad (8)$$

де ϕ_1 – потенціал, що створюється одним джерелом; S – площа поверхні резонатора; $Z(\omega)$ – механічний імпеданс (акустичний опір) резонатора.

Слід відзначити, що механічний імпеданс має комплексний характер (має як активну R , так і реактивну X складові, що залежать від режиму роботи резонатора):

$$Z(\omega) = R + iX. \quad (9)$$

Для системи «джерело – резонатор» з багатьма ступенями свободи, зони посилення й послаблення, що чергуються, визначаються з умови:

за $\left[1 + \frac{\rho\omega S^2}{iZ(\omega)4\pi d} \right] > 1$ система працює в посилюючому режимі;

за $\left[1 + \frac{\rho\omega S^2}{iZ(\omega)4\pi d} \right] < 1$ реалізується за послаблення;

за $\left[1 + \frac{\rho\omega S^2}{iZ(\omega)4\pi d} \right] = 1$ наявне чергування переходів зон посилення з зонами послаблення.

Імпеданс (опір) резонатора, за якого ці переходи можливі, називають граничним $Z_{\text{гп}}(\omega)$. З останнього рівняння витікає значення граничних імпедансів:

$$Z_{\text{гп1}} = \pm \infty \text{ і } Z_{\text{гп2}} = 1/2 Z_{\text{ап}}.$$

Тут $Z_{\text{ап}}$ – вхідний опір (імпеданс) резонатора, за якого він налаштований на антирезонанс.

$$Z_{\text{ап}} = \frac{i\rho CS(kr_o)^2}{4\pi d} = \frac{i\sqrt{\rho GS}(kr_o)^2}{4\pi d},$$

де r_o – ефективний (характерний) розмір резонатора; ρ – щільність середовища; ω – резонансна частота; d – відстань між джерелом і резонатором; k – хвильове число; C – фазова швидкість хвилі в середовищі, $C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$; G – модуль зсуву резонатора.

Система працює з посиленням, коли модуль об'ємного стискання проходить через безкінечність $K = \infty$ і змінює знак або зменшується; з послабленням – коли модуль зсуву зменшиться в 4 рази та хвильовий опір дорівнюватиме половині антирезонансного. Коли модулі зсуву та об'ємного стискання зрівнюються, виникає ударна хвиля, значне зростання амплітуди поперечних (вихрових) коливань і руйнування в динамічному режимі.

В [13, с. 416] показано, що натеper розрізняють чотири види резонансів:

– резонанс по швидкості й частоті – збудження коливальною системою одного набору частот з можливого спектра;

– структурно-хвильовий резонанс по швидкості й розмірах – збудження коливальною системою її структурних елементів, коли характерні розміри структурного елемента близькі або кратні розмірам системи;

– подвійний вихро-хвильовий резонанс по швидкості, розмірах, частоті й параметрах вихрових структур, що є причиною різкої зміни сил взаємодії між структурним елементом і середовищем з утворенням нових диспергувальних хвиль і вихрових структур;

– структурний резонанс – резонансна взаємодія через середовище кількох несиметричних систем з межами розподілу або вихровими структурами.

Всі гео- і газодинамічні явища в гірському масиві пов'язані з третім і четвертим видом резонансів, тому доцільно провести їх експериментальні дослідження й натурні спостереження.

Постановка завдання. Дослідження змін приросту деформацій і пружних параметрів гірських порід з метою встановлення резонансних явищ під час їх деформування та руйнування.

Методи дослідження. Для досягнення мети застосовувалися лабораторні дослідження пове-

дінки гірських порід в умовах нерівнокомпонентного об'ємного стискання на установці нерівнокомпонентного тривісного стискання (УНТС) конструкції ДонФТІ НАН України та було змінено спосіб представлення отриманих експериментальних даних.

Виклад основного матеріалу дослідження. Інформативність експериментальних досліджень значною мірою визначається типом експериментального обладнання, кількістю показників, що фіксуються під час проведення експерименту, методикою оброблення отриманих даних, способом їх представлення й аналізу.

Експерименти з випробування гірських порід в умовах нерівнокомпонентного стискання ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) проведено на установці нерівнокомпонентного тривісного стискання конструкції ДонФТІ НАН України (рис. 5).



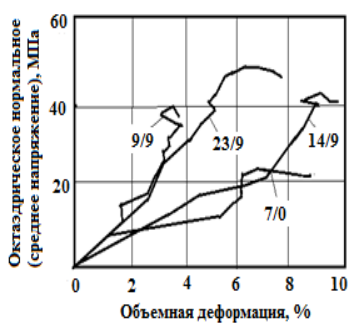
Рис. 5. Установка нерівнокомпонентного тривісного стискання конструкції (УНТС) ДонФТІ НАН України

Традиційно результати досліджень поведінки порід в умовах нерівнокомпонентного стискання наводять у вигляді діаграм: «кульовий тензор напружень – відносна об'ємна деформація»,

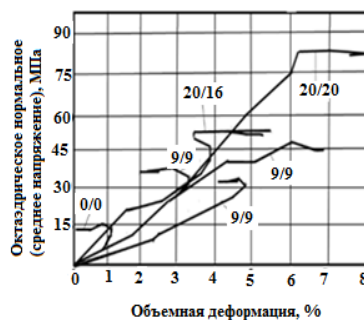
«октаедричне дотичне напруження – відносна октаедрична дотична (зсувна) деформація», «максимальне напруження – максимальна деформація» тощо. Вказані діаграми допомагають визначити пружні параметри (модуль об'ємного стискання, модуль зсуву, коефіцієнт поперечної деформації), характерні деформації, за яких пружні параметри змінюються стрибком, закономірності зміни міцності порід від виду напруженого й деформаційного стану тощо. Але ні абсолютна величина навантаження, ні величина відносних деформацій в загальному випадку критерієм руйнування бути не можуть навіть для одного і того ж виду напруженого стану, або одного й того ж самого кульового тензора напружень. Межа міцності та гранична відносна деформація залежать від багатьох факторів, вплив яких навіть не завжди усвідомлюється.

Для прикладу, на рис. 6 і 7 наведено діаграми «кульовий тензор напружень – відносна об'ємна деформація» і «октаедричне дотичне напруження – відносна октаедрична дотична (зсувна) деформація».

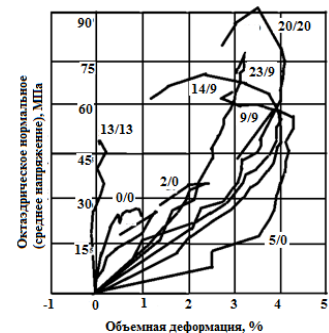
Наведені діаграми добре віддзеркалюють зміни відносних деформацій у процесі навантаження. На них видно перелами зі стрибкоподібною зміною модулів пружності, що свідчать про наявність електронних і структурно-фазових переходів у мінералах, з яких складаються гірські породи. На рис.6 добре видно структурно-фазові переходи першого і третього роду. Переходи першого роду йдуть зі зменшенням об'єму в умовах постійного тиску, а третього роду (так звані критичні переходи) – зі збільшенням об'єму за зростання тиску. Про структурно-фазові переходи другого роду свідчать стрибкоподібні зміни модулів усестороннього стискання на рис. 6 і модулів зсуву на рис. 7.



а)



б)



в)

Рис. 6. Залежність «октаедричне нормальне напруження (кульовий тензор) – об'ємна деформація» для об'ємного напруженого стану (через дріб вказано величини проміжного й мінімального напруження): а) для вугілля; б) для аргілітів; в) для пісковиків

З діаграм «середнє напруження – об’ємна деформація» (рис. 7) добре видно, що модуль об’ємного стискання в процесі навантаження закономірно зростає, а на порозі дилатансії (межі стискання) проходить через точку біфуркації ($+^{\circ}$) і змінює знак (зменшення об’єму змінюється збільшенням об’єму). Цю точку називають структурно-фазовим переходом третього роду, або критичним переходом. Інколи одразу за цим відбувається руйнування. Але в більшості випадків спостерігається зміцнення породи (наклеп), коли численні тріщини, що утворилися внаслідок збільшення об’єму під час структурно-фазового переходу, заважають одна одній поширюватися. Модуль зсуву (рис. 7), навпаки, на початку стискання має дуже великі, в тому числі й від’ємні значення, проходячи через точку біфуркації

($-^{\circ}$), змінює знак на позитивний і неспинно зменшується до виникнення антирезонансу.

На рис. 8 представлені діаграми «максимальне напруження – максимальна деформація» для пісковиків і вугілля. Наведені дані дають змогу встановити міцність порід, модулі пружності та спаду, характерні максимальні лінійні деформації, за яких модулі змінюються стрибком (рис. 8, а). Традиційно діаграми малюють згладженими, але перелами (особливо в породах) є настільки чіткими, що згладжування спричинює втрату фізичного сенсу. Неважко помітити, що й у вугіллі, і в пісковиках спостерігаються шість-сім характерних точок переламу діаграми. Характерні деформації, за яких відбуваються стрибки модулів пружності, доповнюють єдиний ряд 0,64; 1,0; 1,5; 1,8; 2,25; 2,6; 3,0; 3,7; 4,6; 5,8; 6,3; 7,0; 8,3; 9,7;

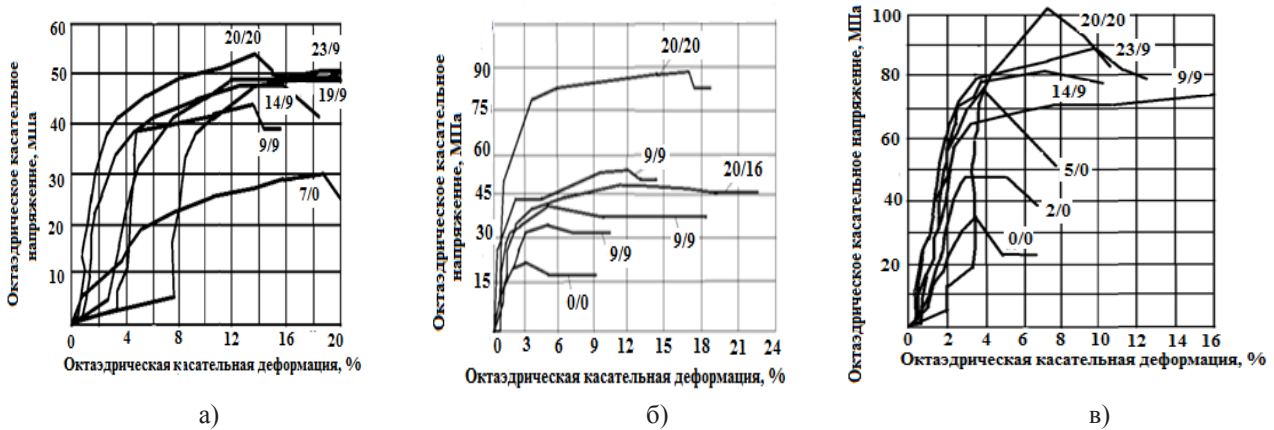


Рис. 7. Залежність «октаедричне дотичне напруження – октаедрична зсувна деформація» для об’ємного напруженого стану (через дріб вказано величини проміжного й мінімального напруження): а) для вугілля; б) для аргілітів; в) для пісковиків

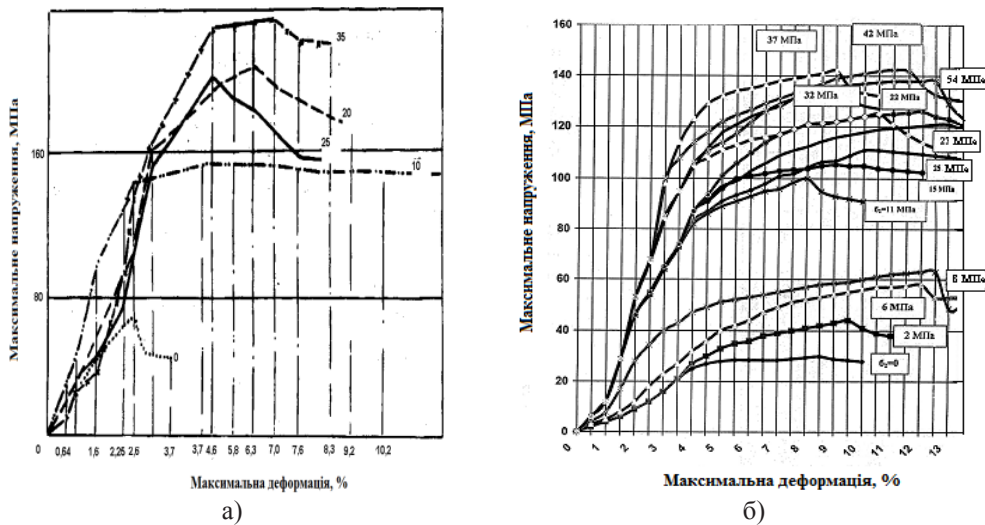


Рис. 8. Діаграми «максимальне напруження – максимальна деформація» для пісковиків за $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ (а) і для вугілля за різних значень мінімального σ_3 і проміжного σ_2 стискальних напружень (б)

11,2; 12,7; 13,7; 14,5; 16,3%, який підпорядковується універсальному прояву структурної гармонії – закону золотого перетину й може бути представлений у вигляді:

$$\gamma_N = \left(\frac{1}{\Phi}\right)^{\frac{1}{2} + \frac{1}{4}}; s_N = \Phi \left(\frac{1}{\Phi}\right)^{\frac{1}{2} + \frac{1}{4}}; \varepsilon_N = \Phi^2 \left(\frac{1}{\Phi}\right)^{\frac{1}{2} + \frac{1}{4}};$$

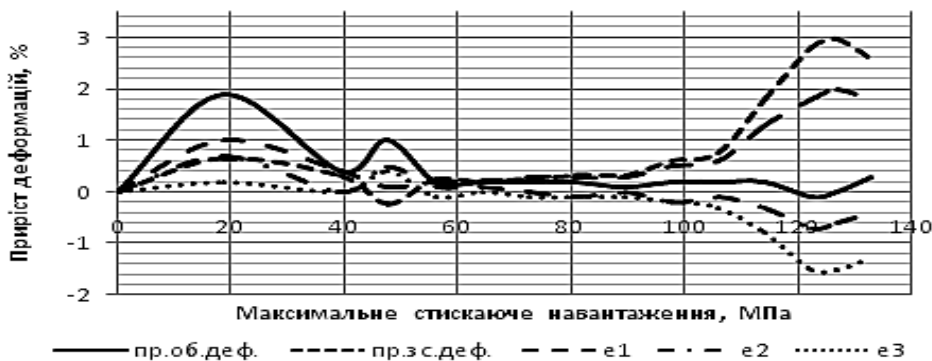
де γ_N , s_N , ε_N – зсувна, вихрова (ротаційна) й нормальна (лінійна) деформація відповідно; $\Phi = 1,618$ – число Фідія (золоте число); $\ell = 1,2,3 \dots$ – будь-яке ціле квантове число.

Традиційний підхід до інтерпретації отриманих експериментальних даних на цьому себе вичерпав, тому в роботі пропонується, перш за все, дослідження приросту всіх трьох деформацій у процесі навантаження, їхньої зміни та впливу на пружні параметри гірських порід, оскільки за визначенням пружні модулі є відношенням приросту навантаження до приросту деформацій.

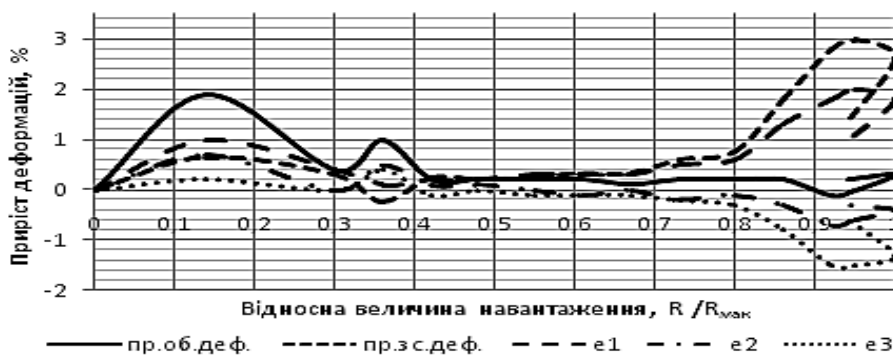
Фіксація деформацій під час випробувань призматичних зразків гірських порід здійснювалася механічними датчиками годинникового типу з

точністю 10^{-6} м. Тензорезисторні датчики руйнівні деформації до 10–20% зафіксувати неспроможні. Максимальне зовнішнє навантаження, що формується на зразку розміром $50 \times 50 \times 50$ мм, під час роботи манометра в безпечній зоні становить приблизно 400 МПа. Для відповідної й синхронної фіксації деформацій ступінь навантаження становив 2МПа. Для отримання надійних результатів для кожного експерименту проводилося не менше як три випробування.

На рис. 9, 10 наведено дані зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних відносних деформацій у процесі навантаження зразка вугілля за різних видів напруженого стану. Аналогічні залежності наведено на рис. 11, 12 для пісковику. Дані наведені двічі: залежність приросту деформацій від абсолютної величини максимального стискального напруження й від відносної величини (поточне значення віднесене до руйнівного). Це дає змогу оцінити наочно подібність залежностей для всіх порід і всіх видів напруженого стану.



а)



б)

Рис. 9. Зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних деформацій у процесі навантаження зразка вугілля за $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20$ МПа від абсолютної величини максимального стискального напруження (а) й відносної величини максимального навантаження (віднесене до руйнівного) (б)

Аналізуючи наведені дані, варто констатувати, що процес деформування гірських порід за механічного навантаження в умовах нерівнокомпонентного тривісного стискання можна розділити на чотири етапи:

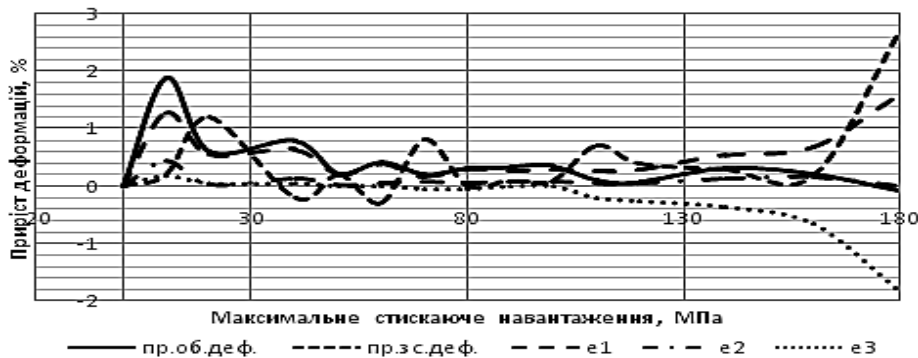
1 – інтенсивне зменшення об’єму на початковій стадії деформування практично без зміни форми (за навантажень до 0,3-0,4 від руйнівних);

2 – зменшення приросту об’ємної деформації до нуля (досягнення порогу дилатансії або точніше межі стискання), коливання приросту решти деформацій з амплітудою не більше 0,5% (за навантажень до 0,6–0,75 від руйнівних);

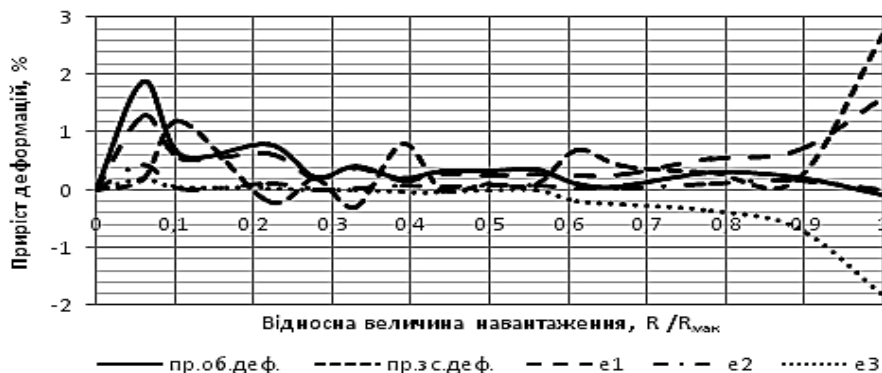
3 – різке зростання приросту зсувних, мінімальної й максимальної лінійних деформацій до кількох відсотків (за навантажень 0,85–0,99 від руйнівних), збільшення об’єму породи;

4 – інверсія приросту всіх видів деформацій і динамічне руйнування породи з різким спадом навантаження (спостерігається практично перед руйнуванням за 0,99 від руйнівного навантаження). За відсутності спаду навантаження відбувається пластичний коливальний зсувний процес (течія).

Наявність третього етапу, за якого амплітуда приросту лінійних і зсувних деформацій зростає в кілька разів (від десятих часток відсотка до кількох відсотків), свідчить про наявність резонансних явищ. Перехід руйнування в динамічне або в течію пов’язаний з типом резонансу. Для виявлення відповідності типу резонансу теоретичним уявленням, наведеним вище, розглянемо зміни пружних параметрів у процесі навантаження. На рис. 13 і 14 наведено дані зміни модуля всебічного стискання, модуля зсуву й коефіцієнта поперечної деформації для вказаних вище зразків. Наведені дані свідчать про те, що вугілля й пісковик є класичними ауксетиками та мають від’ємний коефіцієнт поперечної деформації. Модуль зсуву до межі стискання періодично змінюється, проходячи в пісковиках через точку біфуркації ($-^{\circ}$), а після досягнення межі стискання поступово зменшується практично до нуля. Модуль об’ємного стискання періодично змінюється до межі стискання, на межі стискання різко зростає, часто проходячи через точку біфуркації ($+^{\circ}$), а після точки біфуркації різко зменшується, набуваючи від’ємних значень. У процесі навантаження модулі зрівнюються кілька разів (наступає резонанс

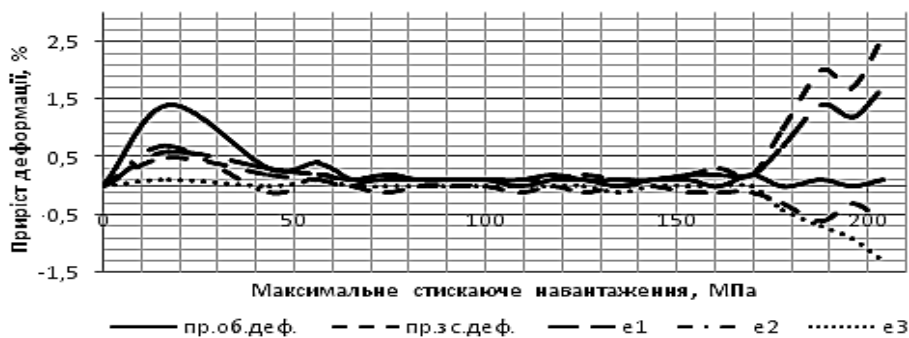


а)

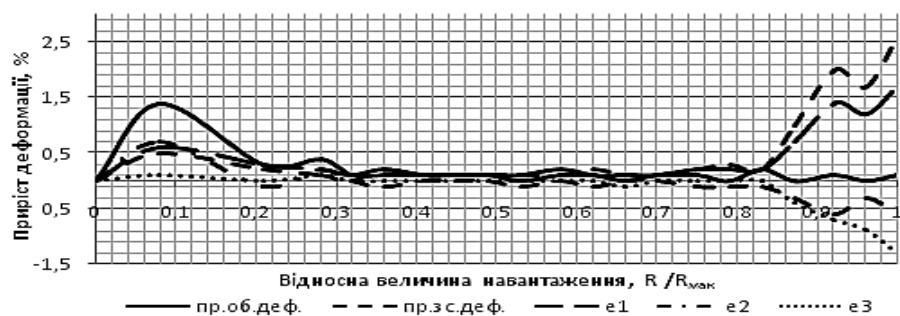


б)

Рис. 10. Зміни приросту об’ємних, зсувних і лінійних деформацій у процесі навантаження зразка вугілля за $\sigma_1=\sigma_2>\sigma_3=22$ МПа

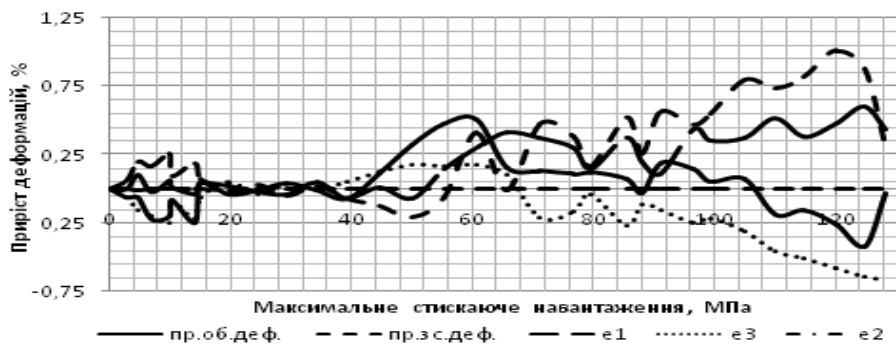


а)

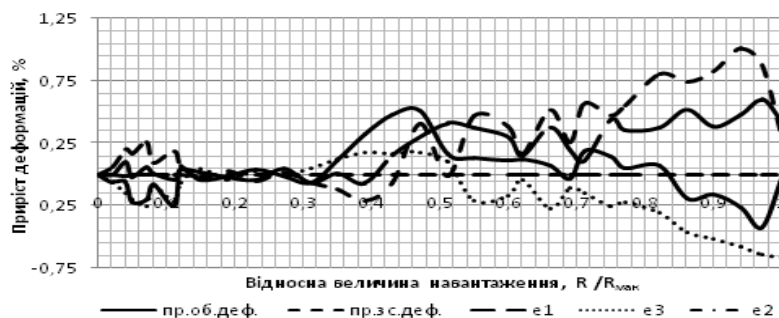


б)

Рис. 11. Зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних деформацій у процесі навантаження зразка пісковику за $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 23$ МПа; $\sigma_3 = 9$ МПа



а)



б)

Рис. 12. Зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних деформацій у процесі навантаження зразка пісковику за $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 13$ МПа

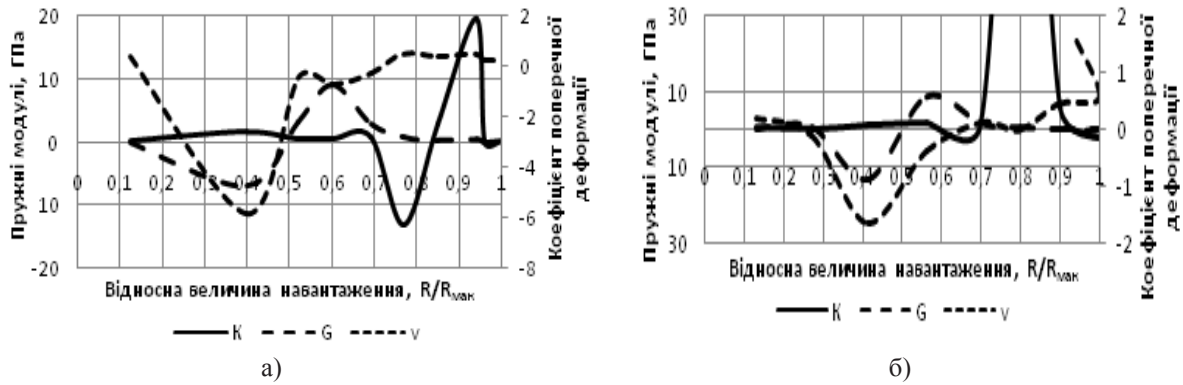


Рис. 13. Зміна пружних параметрів у процесі навантаження для вугілля:
 а – за $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ($\sigma_2 = 23$ МПа; $\sigma_3 = 9$ МПа);
 б – за $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ($\sigma_2 = 30$ МПа; $\sigma_3 = 20$ МПа);

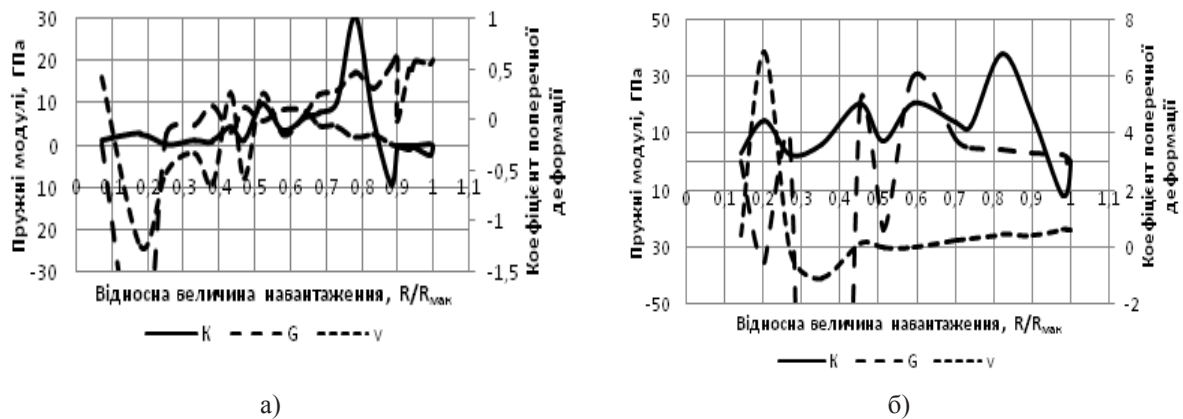


Рис. 14. Зміна пружних параметрів у процесі навантаження для пісковика:
 а – за $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 9$ МПа; б – за $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ($\sigma_2 = 35$ МПа; $\sigma_3 = 20$ МПа);

по швидкості), але до межі стискання це стається за протифазної зміни модулів і відбувається резонанс у режимі монохроматора (течія під дією об'ємної складової деформаційного поля). Лише після біфуркації модуля всебічного стискання обидва модулі зрівнюються за синфазного зменшення й наступає антирезонанс у режимі акустичного резонансного поглинання (АРП) з різким зростанням приросту амплітуди деформації (на величину добротності). Коли модуль зсуву й модуль об'ємного стискання зрівнюються (швидкість переміщення часток речовини перевищує швидкість звуку), виникає ударна хвиля й динамічне руйнування. Якщо ударна хвиля не виникає, руйнування відбувається у вигляді течії.

Висновки. Таким чином, основною причиною механічного руйнування гірських порід є подвій-

ний резонанс по швидкості, розмірах і частоті. Спочатку резонанс відбувається на частоті монохроматора (модуль об'ємного стискання зростає до безкінечності), виникає течія, потім на частоті антирезонансу, коли модуль зсуву зменшується відносно резонансного в 4 рази й швидкість переміщення частин у спірально-вихровій хвилі перевищує швидкість звуку в середовищі, виникає ударна хвиля й динамічне руйнування. Оскільки різниця між частотами резонансу й антирезонансу становить біля 15%, можливий перехід течії в динамічне руйнування з певним запізненням.

Передвісником і критерієм руйнування гірських порід є резонансне зростання на порядок амплітуди приросту максимальної та мінімальної лінійних деформацій.

Список літератури:

1. Чечельницький А.М. Волновая структура Солнечной системы. Дубна : Международный университет «Дубна», 2000. 75 с.
2. Кумченко Я.А. Технология и обоснование необходимости мониторинга космической погоды для прогнозирования локальных земных катастроф. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 4 (61). С. 95–103.

3. Епифанов В.А. Геогалактические пульсации, пространство – время Земли и гармония стратиграфической шкалы. *Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья»*. Новосибирск. 2012. № 4 (12). С. 90–103.
4. Петров Н.В. Витакосмология: основы для понимания реального знания. Ч. 2. Санкт-Петербург : Береста, 2013. 388 с.
5. Басин М.А. Волны. Кванты. События. Волновая теория взаимодействия структур и систем. Ч.1. Санкт-Петербург : Норма, 2000. 168 с.
6. Уилкок Д. Божественный космос. ЛитЛайф [Электронная библиотека]. 2010. 70 с. URL: <http://divinecosmos.e-puzzle.ru/>.
7. Хлыстов А.И., Клиге Р.К., Сидоренков Н.С. Резонанс третьего рода в Солнечной системе. *Современные проблемы наук о Земле и исследования Солнечной системы* : Сагитовские чтения, 30–31 мая 2011 г., Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга Московского государственного университета. 2011. 39 с. URL: <http://lnfm1.sal.msu.ru/grav/Russian/life/chteniya/sagit2011/Y\Hlystov2011.pdf>.
8. Молчанов А.М. Гипотеза резонансной структуры Солнечной системы. *Пространство и время*. 2013. № 1 (11). С. 34–48.
9. Никольский Г.А. О пятом взаимодействии. *Торсионные поля и информационные взаимодействия – 2009* : материалы междунар. научн. конф., Хоста – Сочи, 25–29 августа 2009 г. Москва : 2009. С. 56 – 75.
10. Никольский Г.А. Энергетика солнечно-вихревого излучения и его взаимодействие с веществом. *Торсионные поля и информационные взаимодействия – 2009* : материалы междунар. научн. конф. Хоста – Сочи, 25–29 августа 2009 г. Москва : 2009, С. 46–55.
11. Гликман А.Г. Эффект акустического резонансного поглощения (АРП) как основа новой парадигмы теории поля упругих колебаний. *Геофизика XXI столетия: 2003–2004 годы* : сборник трудов Пярых и Шестых геофизических чтений. В.В. Федынского. Москва – Тверь: ГЕРС. 2005. С. 293–299.
12. Кумченко Я.А. Единая резонаторная природа силового взаимодействия в микро- и макромире: альтернативная теория. *Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики* : збірник наукових праць. Кривий Ріг : Видавничий відділ НацМетАУ, 2002. Т. 2. С.162–177.
13. Басин М.А. Вихре-волновой резонанс. *Синергетика и методы науки* : труды семинара. Санкт-Петербург : Наука, 1998. С. 415–418.

Riazantsev M.O., Nosach O.K., Riazantsev A.M. CAUSES AND MECHANISM OF ROCK DREAKING

Objective is determine reasons and development of deformation signs of rock breaking.

Methodology – The paper represents laboratory experimental data concerning rock deformation and breaking in volumetric stress state in terms of the plant of unequal-component volumetric uniaxial compression designed by DonPhTI of the NAS of Ukraine. Condition of the development of resonance phenomena, while rock deforming and breaking, have been analyzed.

Results – It has been demonstrated that rock is a classic auxetics in which elastic parameters change their value and sign in the process of mechanical loading. Characteristic deformations, in terms of which elastic characteristics change their value, are quantified and constant for all the materials. It has been shown that deformation increment is with alternating signs that highlights wave nature of the deformation. During deformation, four characteristic stages have been singled out that's is peculiar for all the rocks irrespective of the type of stress state and value of extensive pressure. Sign of breaking is represented by resonant increase in the amplitude of increment of linear and shearing deformations at stage three due to double vortex- wave resonance in terms of velocity, structural dimensions, and frequency. While comparing as for the values of shearing modulus and volumetric compression (velocity of proper oscillation of rock particles and sound velocity within the medium), shock wave and dynamic breaking take place. If there is no velocity resonance, then «slow» flow is observed.

Scientific novelty – For the first time, it has been demonstrated that elastic characteristics of rocks are not the material constants but they are structurally sensitive characteristics of deformation resistance with changes in their value and sign while mechanical loading; shearing deformations are of rotational nature. Process of rock deformation includes four characteristic stages. From the viewpoint of breaking, stage three is the most interesting one – resonant increase in the increment of maximum, minimum, and shearing deformation. When modulus of volumetric compression is equal to a shearing modulus, anti-resonance and shock wave take place. If there is no stock wave, then the material just flows.

Practical implications – resonant increase in the amplitude of increment of maximum, minimum, and shearing deformation is the criterion of breaking in general and the criterion of dynamic breaking in particular; in practice, it can be used as a sign or prognostic criterion of breaking.

Key words: increment of deformation, moduli of elasticity, spiral-vortex wave, anti-resonance, breaking.