

ВПЛИВ ТЕКТОНІЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА ФІЛЬТРАЦІЙНО-ЄМНІСНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЛИБОКОЗАЛЯГАЮЧИХ ПОРІД

Г.М. Бондар¹, М.І. Євдошук², О.Л. Зімін³

¹ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: galyna-bondar@i.ua
Аспірантка.*

² *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: myevdoshchuk@rambler.ru
Доктор геологічних наук, завідувач відділу.*

³ *Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна,
E-mail: ziminoleg2@gmail.com
Старший викладач.*

Досліджені деформаційні та міцнісні властивості гірських порід різних генетичних типів, а також колекторські властивості порід-колекторів нафти і газу при різних напружених станах, характерних для великих глибин. Виділені деякі особливості механізму формування і розвитку тріщин у неоднорідних твердих тілах при розтягуванні і стисненні. Розглянуті характерні особливості механізму незворотної деформації порід при нерівномірному об'ємно-напруженому стані. Встановлено, що в умовах, типових для глибин 8-10 км, у більшості гірських порід незворотна деформація супроводжується розуцільненням їх структури, що зумовлює збільшення коефіцієнтів пористості і проникності. Показані різні залежності приросту об'єму і коефіцієнта проникності від всебічного стиснення при нерівномірному тривісному напруженому стані, побудовані за даними пісковика та мармуру. Також наведені типові діаграми деформацій гірських порід при нерівномірному всебічному стиску.

Ключові слова: фільтраційно-ємнісні та колекторські властивості; незворотна деформація; нерівномірне тривісне стиснення і розтягування; межа міцності; тріщини; розпушення; розуцільнення.

TECTONIC DEFORMATION INFLUENCE ON FILTRATION-CAPACITIVE PROPERTIES OF DEEP-LYING ROCKS

H.M. Bondar¹, M.I. Yevdoschuk², O.L. Zimin³

¹ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, E-mail: galyna-bondar@i.ua
PhD student.*

² *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, E-mail: myevdoshchuk@rambler.ru
Doctor of geological sciences, head of the department.*

³ *Yuriy Kondratyuk National Technical University of Poltava, Ukraine, E-mail: ziminoleg2@gmail.com
Senior lecturer.*

The paper is dealing with the study of deformation and strength properties of various rocks, as well as collector properties of oil and gas reservoirs under various stress conditions, that are typical for large depths. Some features of fractures formation and development in heterogeneous solids under extension and compression are identified. The characteristic features of the mechanism of irreversible deformation of rocks under uneven volume-strained state are considered. It has been defined that under conditions typical for depths of 8–10 km, irreversible deformation occurs with decompression of their structure, increasing the coefficients of porosity and permeability. Different dependences of volume growth and coefficient of permeability on the all-round compression under uneven triaxial stress, based on data of sandstone and marble, are shown. Typical diagrams of rocks deformations under uneven all-round compression also are shown.

Key words: filtration-capacitive and collector properties; irreversible deformation; uneven triaxial compression and extension; break point; fractures; loosening; decompression.

ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ ПОРОД

Г.М. Бондар¹, Н.И. Евдошук², О.Л. Зимин³

¹ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина., E-mail: galyna-bondar@i.ua
Аспирантка.*

² *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: myevdoshchuk@rambler.ru
Доктор геологических наук, заведующий отделом.*

³ *Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина,
E-mail: ziminoleg2@gmail.com
Старший преподаватель.*

Исследованы деформационные и прочностные свойства горных пород различных генетических типов, а также коллекторские свойства пород-коллекторов нефти и газа при различных напряженных состояниях, характерных для больших глубин. Выделены некоторые особенности механизма формирования и развития трещин в неоднородных твердых телах при растяжении и сжатии. Рассмотрены характерные особенности механизма необратимой деформации пород при неравномерном объемно-напряженном состоянии. Установлено, что в условиях, типичных для глубин 8-10 км, в большинстве горных пород необратимая деформация сопровождается разуплотнением их структуры, обуславливает увеличение коэффициентов пористости и проницаемости. Показаны различные зависимости прироста объема и коэффициента проницаемости от всестороннего сжатия при неравномерном трехосном напряженном состоянии, построенные по данным песчаника и мрамора. Также приведены типичные диаграммы деформаций горных пород при неравномерном всестороннем сжатии.

Ключевые слова: фильтрационно-емкостные и коллекторские свойства; необратимая деформация; неравномерное трехосное сжатие и растяжение; предел прочности; трещины; разрыхление; разуплотнение.

Вступ

Дослідження деформаційних і міцнісних властивостей гірських порід в умовах нерівномірного тривісного стиснення і розтягування були розпочаті ще F.D. Adams; E.C. Coker; R. Voker; П.В. Бриджмен та ін. [Adams, Coker, 1910; Voker, 1915; Бриджмен, 1935]. Широкий розвиток ці дослідження отримали в останні роки у зв'язку з вивченням будови глибинних зон Землі, вирішенням завдань пошуків і розвідки корисних копалин на великих глибинах, а також досягнутим прогресом у техніці експерименту при високому тиску.

Дослідження, які проводилися [Павлова, 1975] в умовах об'ємних напружених станів при різних схемах навантаження (поздовжнє стиснення і розтягування, зсув, вигин і кручення), дозволили встановити, що вплив накладеного всебічного стиснення у всіх випадках викликає зміну (підвищення) пружних, пластичних і міцнісних властивостей гірських порід.

Результати вивчення деформаційних і міцнісних властивостей гірських порід розглянуті в ряді публікацій [Байдюк, 1963; Шрейнер та ін., 1968; Griggs, Handin, 1960; Handin, 1966]. Встановлено суттєву різницю в деформаційній поведінці та опорі руйнуванню гірських порід осадового комплексу, з одного боку, і магматичних,

а також більшості метаморфічних порід – з іншого. При тисках і температурах, характерних для глибин в декілька кілометрів, більшість осадових порід проявляє здатність до значної пластичної деформації.

У метаморфічних і магматичних породах навіть при тисках і температурах, близьких до характерних для глибин 15-20 км, незворотні деформації мають незначний розвиток, при цьому вони зазвичай локалізовані в зонах зсуву. Серед осадових порід здатність до пластичної деформації навіть в умовах атмосферного тиску виявляють деякі сульфатно-галогенні (кам'яна сіль, гіпс) і глинисті породи. Велика частина глинистих, карбонатних і піщано-алевритових порід проявляє здатність до пластичної деформації в умовах нерівномірного об'ємно-напруженого стану стиснення при значеннях $\sigma_{\text{он}}$ (або $\sigma_{\text{эф}}$), характерних для глибин від 1,5-2 до 8-10 км.

Було встановлено, що в породах з високим вмістом кварцу з підвищенням температури відбувається зростання показників міцності (σ) в широкому діапазоні зміни температур (до 400-600°C). У більшості ж осадових, метаморфічних і магматичних порід з ростом температури спостерігається зменшення міцності і зростання здатності до пластичної деформації (ϵ).

До основних факторів, що визначають вплив температури на міцність і деформацію гірських порід, відносять [Байдюк, 1963; Дмитриев и др., 1969; Клочко, 1958; Шрейнер и др., 1968; Nardin, 1966]: неоднорідність порід; термостійкість і міцність мінералів; тип кристалічної будови і характер границь між зернами породотвірних мінералів; фізико-хімічні властивості флюїдів, що насичують деформаційні породи, та ін.

Особливо великий вплив на деформаційні і міцнісні властивості осадових порід мають флюїди в рідинному стані, що їх насичують, внаслідок адсорбційного ефекту (ефекту Ребіндера – полегшення диспергування під впливом адсорбції). Вплив активних рідин, у порівнянні з неактивними, на процес деформації порід в умовах спільної дії всебічного стиснення і температур в основному виражається в зменшенні міцності і напруг в зоні пластичної деформації, особливо в разі міжзернового ковзання.

Більшість метаморфічних і магматичних порід, як і мінерали, що їх складають, в діапазоні напруг і температур, типових для глибин до 15 км, проявляє значно меншу здатність до пластичної деформації, ніж осадові породи.

Вивчення характеристик міцності і деформаційних властивостей гірських порід в умовах напружених станів і температур, типових для глибин до 10-15 км, може бути використано для вирішення різних завдань нафтової геології і гірничої справи. Зокрема, для визначення фільтраційно-ємнісних та колекторських властивостей глибокозалягаючих порід, які зазнали незворотних деформаційних змін, в тому числі розущільнення при пластичній деформації; велике значення мають процеси розчинення і вилугування хімічно нестійких елементів.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 зображені типові діаграми деформацій різних гірських порід в умовах нерівномірного тривісного стиснення, на яких наведені прийняті позначення їх основних деформаційних і міцнісних характеристик [Павлова, 1975]. На рисунку видно, що в деяких випадках (рис. 1, В, Д) опір руйнуванню може не відповідати величині межі міцності.

Слід зазначити, що якщо початок розвитку руйнування характеризується утворенням мікротріщин, однієї або кількох ізольованих тріщин, то процес загального руйнування являє собою поділ твердого тіла на частини, тобто повну втрату ним суцільності.

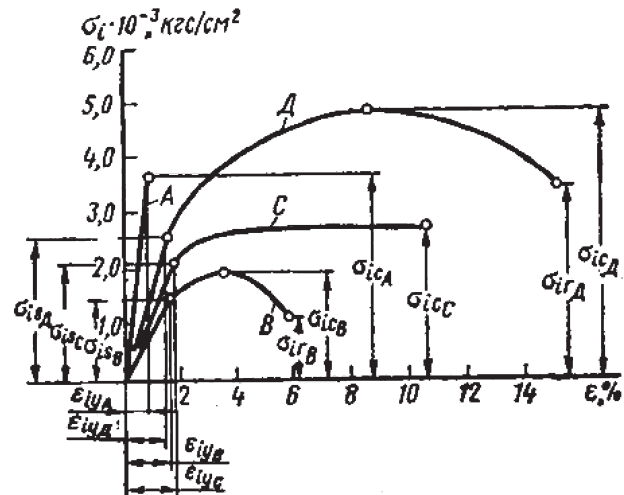


Рис. 1. Типові діаграми деформацій гірських порід при нерівномірному всебічному стиску [Павлова, 1975]:

А – пружно-крихкі породи; В – обмежено пластичні породи; С і D – пластичні і високопластичні породи. σ_i – деформаційне напруження, e_l – поздовжня деформація (e_{iy} – пружна, e_{in} – пластична); σ_{is} , σ_{ic} і σ_{ir} – відповідно межа текучості, міцності та опору руйнуванню

Fig. 1. Typical diagrams of rocks deformation under uneven all-round compression [Павлова, 1975]:

A – elastic-brittle rocks; B – limited plastic rocks; C and D – plastic and high-plastic rocks. σ_i – deformation stress, e_l – longitudinal deformation (e_{iy} – elastic, e_{in} – plastic); σ_{is} , σ_{ic} and σ_{ir} – the fluidity point, break and resistance to breakage points respectively

В роботі Т. Jokobori [Jokobori, 1965] процес руйнування твердих тіл розглянуто з точки зору мікроструктурних відмінностей. При цьому характерні для тривісного нерівномірного стиснення види руйнування порід сколом і зрізом, коли тріщини загального руйнування перетинають зерна полікристалічного тіла, названі транс-кристалічним руйнуванням, на відміну від ін-теркристалічного руйнування, що відбувається лише по межах зерен.

Останній вид руйнування характерний для стадії незворотної деформації більшості гірських порід, що передуює процесу загального їх руйнування.

Межею текучості σ_{is} (при одновісному стисненні σ_s) зазвичай називають величину напруги відповідного максимального значення пружної деформації. Ця, достатньою мірою умовно виділена, величина має велике значення при вирішенні практичних завдань встановлення фільтраційно-ємнісних характеристик, оскільки нею визначається перехід до незворотних деформацій порід.

Пластичність, як якісна характеристика матеріалу піддаватися значній незворотній деформації без руйнування або без втрати суцільності,

зазвичай оцінюється величиною незворотної деформації до руйнування.

Незворотні деформації гірських порід мають специфічні особливості, пов'язані з їх зернистою, неоднорідною будовою. Здебільшого незворотна деформація порід поєднує два типи деформації – 1) міжзернового ковзання, що супроводжується розвитком мікротріщинуватості, і 2) внутрішньокристалічного, що переважно має розвиток лише при високому тиску.

Аналіз розвитку тріщиноутворення в пісковиках показав [Ставрогін, 1986], що незворотна деформація пісковиків здійснюється за рахунок розвитку головним чином міжзернових тріщин і зміщень по контактах зерен і супроводжується переорієнтуванням глинистих мінералів цементу та уламкового матеріалу внаслідок повороту, а іноді згинання окремих пластинок слюд. Переорієнтування сприяє утворенню та росту міжзернових тріщин, що роз'єднують зерна і цементуючу масу, їх розкриттю і розриву.

Незворотна деформація пісковиків починається з двійникування кристалів кальциту, що складають цемент цих порід, і розвитку внутрішньокристалічних тріщин. У результаті двійникування зерен цементу утворюються канали, пори і розриви суцільності зерен кальциту. Зерна ж кварциту зберігають в основному свою цілісність.

Таким чином, деформаційний процес в даному випадку охоплює найбільш слабкі структури, якими є тут зерна кальциту і границі зерен.

Процеси розпушення і збільшення об'єму при незворотній деформації головним чином викликаються одночасним формуванням міжзернових мікророзривів (мікротріщин) і мікрозсувів по

границях зерен. Мікротріщини відриву формуються переважно вздовж напрямку дії максимального головного напруження.

Щільність мікророзривів і мікрозсувів залежить від величини гідростатичного тиску σ_2 і від виду напруженого стану, що характеризується параметром C [Ставрогін, Тарасов, 2001]. В результаті злиття цих мікропорушень формуються макроскопічні площини зсуву, за якими здійснюється процес незворотної деформації. На поверхні деформованих зразків часто проявляються лінії ковзання, які являють собою слід таких макроскопічних площин зсуву. Спостерігаються дві системи перетинаючих ліній ковзання, кути орієнтування яких по відношенню до осі σ_1 і щільність розташування ліній на одиницю поверхні залежать від виду напруженого стану.

При виході умов граничних станів у горизонтальне положення (область чистого зсуву) лінії ковзання розташовуються під кутом 45° до осі σ_1 , тобто збігаються з областями дії максимальних дотичних напружень. В області напружених станів між чистим зсувом і одновісним стисненням кут нахилу площин ковзання змінюється від 45° до приблизно $18-20^\circ$. В області дії розтягуючих напружень кут нахилу площин руйнування коливається приблизно від 18° при одновісному стисненні до нуля при одновісному розтягуванні. Фото деформованих і зруйнованих зразків з чіткими площинами ковзання і руйнування, що проявилися, наведені на рис. 2, 3 [Ставрогін, Тарасов, 2001]. На рис. 2 показані зразки гірських порід, деформовані при високих бічних тисках σ_2 . На поверхнях зразків чітко видно сліди площин ковзання. На двох середніх зразках

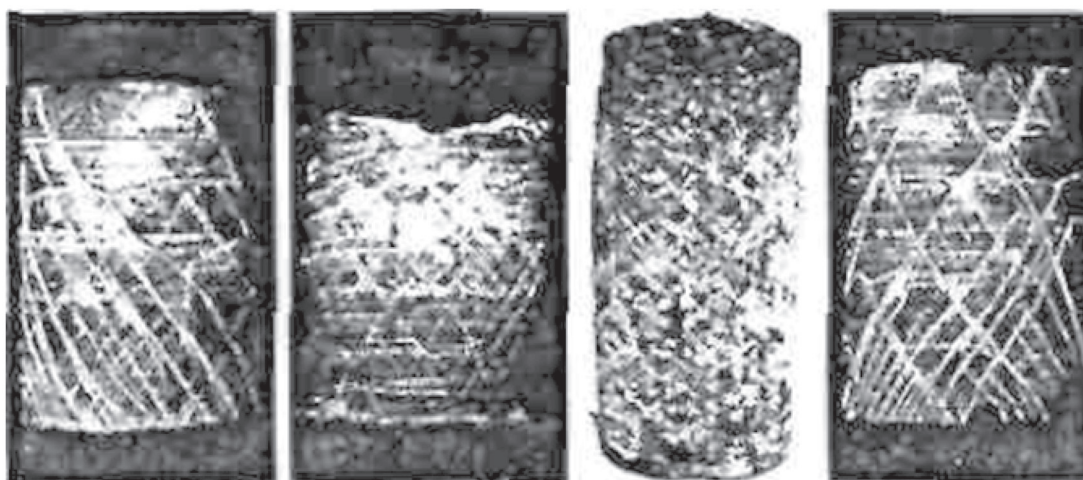


Рис. 2. Фото зразків гірських порід з чіткими слідами площин ковзання [Ставрогін, Тарасов, 2001]

Fig. 2. Photos of rocks samples with well-defined traces of the glide lines [Ставрогін, Тарасов, 2001]

рівень бічних тисків у дослідях був вищим, тому кут нахилу площин ковзання до осі зразка і щільність їх на одиницю площі поверхні тут також більш високі.

Динаміка виникнення і розвитку цих площин така. Перша площина проявляється на поверхні зразка при напруженнях, близьких до межі пружності. Далі зі зростанням напруг в матеріалі кількість площин зсуву зростає аж до межі міцності. Незважаючи на великі деформації, про які свідчить діжковидна форма зразків, деформаційний процес протікає рівномірно по всіх площинах. Опір порід у таких випадках або збільшується, або тримається на рівні досягнутого на межі міцності. На рис. 3 [Ставрогін, Тарасов, 2001] показані зразки, на яких після розвитку незворотних деформацій, що протікають по безлічі площин ковзання, в результаті сформувалася площина руйнування. При цьому деформація по інших площинах припинилася. Такий характер розвитку деформаційного процесу реалізується при низьких і середніх рівнях бічних тисків. Діаграма «напруження–деформація» в таких випадках має чітку спадаючу ділянку за межею міцності.

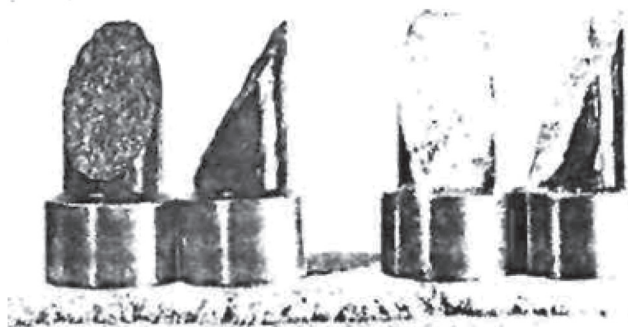


Рис. 3. Фото зразків гірських порід з розвиненими площинами руйнування [Ставрогін, Тарасов, 2001]

Fig. 3. Photos of rock samples with developed breakage surfaces [Ставрогін, Тарасов, 2001]

На підставі розглянутих результатів досліджень [Ставрогін, Тарасов, 2001] можна виділити деякі особливості механізму формування і розвитку тріщин відриву в неоднорідних твердих тілах при розтягуванні і стисненні.

1. Місця зародження тріщин відриву приурочені до різного роду неоднорідностей, що містяться в матеріалі: дефектів, мікротріщин, пор, границь зерен і т. д.

2. Причиною зародження тріщин відриву є концентрація напружень на цих дефектах в результаті неоднорідної пружної або пластичної деформації.

3. В умовах стиснення тріщини відриву поширюються в напрямку дії максимального головного стискаючого напруження, в умовах розтягування – в напрямку, перпендикулярному до дії напруг, що розтягують.

4. Найбільш сприятливі для зародження тріщин відриву кути орієнтації вихідних тріщин по відношенню до діючого напруження такі: при стисканні 30-45° (в залежності від конфігурації вихідної тріщини), при розтягуванні 90-45°.

5. В умовах об'ємного напруженого стану бічне стискаюче напруження σ_2 перешкоджає зародженню і поширенню тріщин відриву, що призводить до зростання міцності матеріалу і скороченню тріщин відриву при однакових напруженнях.

За особливостями деформаційної поведінки, що характеризується за допомогою величин відносних деформацій до руйнування: загальної $\epsilon_i = \Delta L / L_0$ (L_0 – початкова довжина зразка, ΔL – її зменшення) і незворотної (пластичної) $\epsilon_{in} = \epsilon_i - \epsilon_{iy}$, (ϵ_{iy} – пружна складова деформації), всі породи можуть бути розділені на дві великі групи:

1) пружно-крихкі породи, які не піддаються пластичній деформації ($\epsilon_i \leq 1-2\%$; $\epsilon_{in} \ll 0$, рис. 1, А);

2) пластичні породи, серед яких виділяються підгрупи:

а) обмежено пластичних порід, які проявляють здатність до невеликої незворотної деформації ($\epsilon_i \leq 2-10\%$; $\epsilon_{in} = 1-8\%$, рис. 1, В);

б) пластичних і високопластичних ($\epsilon_i > 10-15\%$; $\epsilon_{in} > 8-10\%$, рис. 1, С, Д).

Оскільки для більшості гірських порід у процесі пластичної деформації характерна здатність до розуцільнення (при переважаючому розвитку деформації міжзернового механізму) в умовах нерівномірного всебічного стиснення, становить інтерес аналіз змін їх колекторських властивостей.

Як впливає з проведених досліджень [Павлова, 1975], в результаті деформації при нерівномірному напруженому стані в породах відбувається утворення додаткової (до початкової) деформаційної пористості. Виміри об'єму величини деформаційної пористості з вихідним об'ємом порового простору свідчать про її вплив на ємнісні характеристики порід.

Ефект розуцільнення порід ($+\epsilon_{nsi}$) під дією напружень, подібних тектонічним, може бути настільки значним, що він повністю знімає ущільнення порід, викликане дією ефективних

напружень σ_{ef} ($-\varepsilon_{nsef}$), а в ряді випадків може навіть збільшити пустотність в 1,5-2 рази.

Вплив тектонічних напружень на формування пустотного простору порід в умовах їх природного залягання набагато складніший, ніж такий, що в умовах лабораторного експерименту. На процес формування пустотності в природних умовах великий вплив мають процеси розчинення і вилуговування хімічно нестійких елементів. Можна припустити, що ці процеси повинні більш активно протікати в попередньо деформованих породах.

Таким чином, значення вивчених закономірностей заключається головним чином у визначенні тенденції до розвитку більшого чи меншого розуцільнення (а отже, і ємності) в породах різних літологічних типів під дією тектонічних напруг.

Процес розуцільнення характерний для досить різноманітних за складом і структурою порід, але розвиток його протікає по-різному. Так, в органогенних вапняках відзначені максимальні величини деформаційного приросту пустотності, до того ж з рівномірним розвитком в об'ємі породи. У кварцових пісковиках, метаморфічних і магматичних породах незворотні зміни у вивченому діапазоні ефективних напружень часто мають локалізований характер. З цією особливістю деформаційної поведінки глибокозалягаючих порід пов'язаний більший розвиток тріщинних колекторів серед різних карбонатних порід і зазвичай невеликі за розмірами поклади флюїдів у колекторах тріщинного типу серед піщано-алевритових, метаморфічних і магматичних порід.

Карбонатні гірські породи тріщинуватого типу особливо перспективні на наявність покладів нафти і газу на великих глибинах. Так, ресурси карбонатних відкладів нижнього карбону та верхнього девону оцінюються у декілька трильйонів кубічних метрів газу і десятки мільйонів тонн нафти [Вакарчук та ін., 2013], що є доказом доцільності подальшого вивчення особливостей пустотного простору. Дослідження закономірностей зв'язку між фільтраційно-ємнісними та колекторськими властивостями є важливим етапом геологічного вивчення карбонатних гірських порід-колекторів щодо можливості подальшої розробки покладів нафти та газу.

Такі закономірності знаходять підтвердження при аналізі особливостей будови і колектор-

ських властивостей тріщинних колекторів [Смехов, 1968; Смехов, 1969]. Так, якщо в органогенних вапняках вторинна пустотність, як правило, більше, ніж така у мікрозернистих і співрозмірна за об'ємом з первинною, то і за даними лабораторного експерименту найбільший розвиток незворотної деформації і максимальне розуцільнення структур також встановлені у породах цього типу. В інших щільних карбонатних породах, як у природних, так і в модельованих умовах, вторинна пустотність менше розвинута [Безбородова, 1970].

Розуцільнення структури порід у процесі незворотної деформації повинно сприяти і зростанню проникності порід. Якщо у колекторів тріщинного типу основний вплив на фільтраційні властивості порід мають тріщини, що розвиваються при певному рівні напруг та розміри яких, як показали дослідження [Смехов, 1968; Смехов, 1969], повинні бути більше розміру зерен, то в колекторах порового типу під дією невеликих тектонічних напруг можливий розвиток деформаційного розуцільнення без утворення тріщин.

Зв'язок коефіцієнта проникності ($K_{пр}$) з абсолютною величиною приросту об'єму порід неоднозначний.

На рис. 4, побудованому як за даними для пісковика [Павлова, 1975], так і мармуру [Ставрогін, 1968], показані різні залежності приросту об'єму (ε_v) і коефіцієнта проникності ($K_{пр}$) від всебічного стиснення при нерівномірному тривісному напруженому стані ($\sigma_{он}$). Якщо ε_v спочатку збільшується досить складним чином до деякого максимального значення, а потім зменшується, то $K_{пр}$ з самого початку безперервно зменшується. Отже, за величиною ε_v неможливо визначати значення $K_{пр}$.

При поясненні цього процесу слід врахувати, що збільшення ε_v із зростом σ_3 пов'язано зі збільшенням деформації ε_1 до руйнування, тобто зі зростанням пластичності породи. Цей ускладнений процес можна виключити з розгляду, якщо взяти за основу не величину приросту об'єму ε_v , а параметр граничного розуцільнення K_{vic} .

На рис. 4 наведені залежності K_{vic} і $K_{пр}$ від $\sigma_{он}$ (в роботі [Ставрогін, 1968] від σ_3/σ_1). Видно, що закономірність зміни K_{vic} від всебічного стиснення дуже близька до закономірності зміни $K_{пр}$. У зв'язку з цим можна записати, що $K_{пр} = \eta K_{vic}$, де η – коефіцієнт пропорційності.

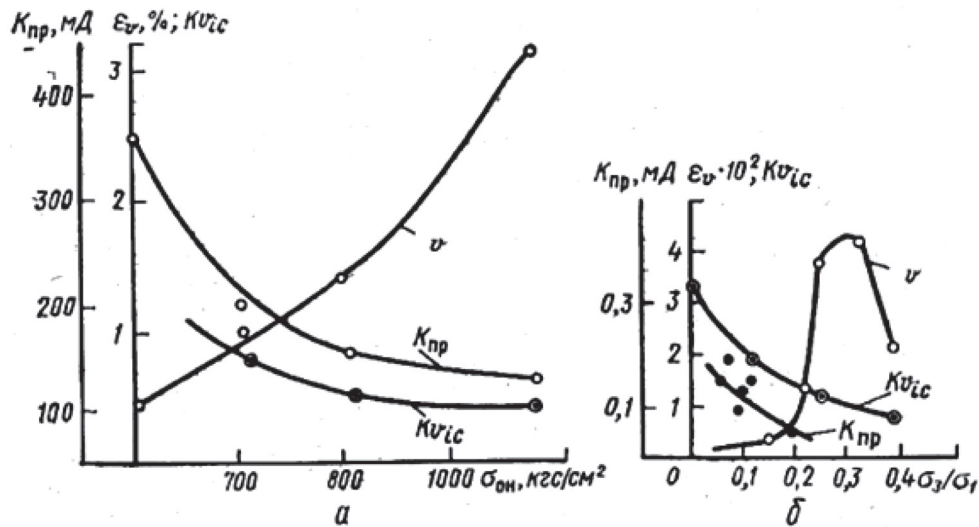


Рис. 4. Залежності приросту об'єму (ε_v), коефіцієнта інтенсивності розущільнення (K_{vic}) і коефіцієнта проникності ($K_{пр}$) від всебічного стиснення при нерівномірному тривісному напруженому стані: а – пісковик, зразок 731К; б – мармур [Павлова, 1975]

Fig. 4. Dependences of volume growth, decompression intensity and permeability coefficients on the all-round compression under uneven triaxial stress: а – sandstone, sample 731K; б – marble [Павлова, 1975]

З рис. 4 випливає, що зі збільшенням пластичності породи (викликаним зростанням σ_3) $K_{пр}$ зменшується, а ε_v при цьому спочатку зростає; тому можна вважати, що зростання ε_v пов'язане з числом N мікророзривів, що розвиваються та довжина яких (менша розміру зерен) зменшується з ростом σ_3 .

Оскільки приріст об'єму при деформації пропорційний добутку числа мікротріщин, що утворилися на їх довжину, то можна вважати, що $K_{vic} = \varepsilon_v / \varepsilon_{iII}$ характеризує головним чином довжину (а отже, і відкритість) деформаційних мікророзривів (мікротріщин). У цьому і полягає фізичний зміст зв'язку K_{vic} з $K_{пр}$.

Висновки

Встановлені деякі загальні особливості процесу деформації порід в умовах, характерних для великих глибин. До найбільш важливих особливостей відносяться: спільність механізму незворотної деформації, збільшення об'єму порід, які визначаються їх літолого-петрографічними особливостями і характером процесів деформації і руйнування порід. Збільшення об'єму кількісно визначається за допомогою коефіцієнта інтенсивності розущільнення та має кореляційний зв'язок з колекторськими і фільтраційно-ємнісними властивостями порід.

Детальні дослідження колекторських властивостей карбонатних гірських порід особливо доцільно проводити з огляду їх значної пер-

спективності на наявність покладів нафти та газу.

Узагальнюючи весь матеріал петрографічних досліджень [Ставрогін, 2001] структурних змін у гірських глибокозалягаючих породах, що відбуваються в процесі їх деформації, встановлено такі важливі з точки зору розуміння механізму розвитку незворотної деформації в неоднорідних тілах положення:

– Процес деформації, що виражається в розвитку тріщинуватості і взаємного зсуву елементів структури, відбувається по найслабших ланках структури, а саме по контактах між зернами найбільш слабого мінералу в полімінеральних породах.

– Незважаючи на дію великих напруг і деформацій, матеріал зберігає свою структурну основу, зерна не втрачають цілісності як структурні елементи, хоча і піддаються різного роду порушенням.

– При дії великих бічних тисків тріщини відриву, що виникають в структурі матеріалу, приурочені, як правило, до контактів між зернами, а розміри їх обмежені розмірами зерен.

– Процес структурних змін на початкових стадіях розвитку незворотної деформації здійснюється в окремих найбільш слабких об'ємах гірської породи, а в міру зростання деформацій і напружень структурні зміни поширюються на весь досліджуваний зразок матеріалу.

– З ростом рівня бічного тиску збільшується ступінь порушеності матеріалу за рахунок охоплення деформаційним процесом все більшого числа елементів структури. Однак існує граничний ступінь порушення матеріалу, що не змінюється при подальшому збільшенні бічного тиску. Це досягається тоді, коли всі структурні елементи залучаються в процес незворотної деформації.

Список літератури

Байдюк Б.В. Механические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах. Москва: Гостоптехиздат, 1963. 102 с.

Безбородова И.В. Верхнеюрские карбонатные отложения центральной части Северного склона Кавказа (междуречье рек Баксан–Черек). *Темат. науч.-техн. обзор «Новые методы исследования трещинных коллекторов нефти и газа»*. Москва: ВНИИОЭНГ, 1970. С. 38–51.

Бриджмен П.В. Физика высоких давлений. Москва: ОНТИ, 1935.

Вакарчук С.Г., Довжок Т.Є., Філюшкін К.К. [та ін.] Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Перспективи освоєння ресурсів газу ущільнених порід у Східному нафтогазоносному регіоні України. Кн. 6. Київ: ТОВ «ВТС ПРИНТ», 2013. 207 с.

Дмитриев А.П., Кузьяев Л.С., Протасов Ю.И. Физические свойства горных пород при высоких температурах. Москва: Недра, 1969. 160 с.

Клочко Н.А. Зависимость механических свойств горных пород от температуры. Шрейнер Л.А. и др. *Механические и абразивные свойства горных пород*. Москва: Гостоптехиздат, 1958. Гл. 8. С. 98–104.

Павлова Н.Н. Деформационные и коллекторские свойства горных пород. Москва: Недра, 1975. 240 с.

Смехов Е.М. (ред.) Методика изучения трещиноватости горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа. Ленинград: Недра, 1969. 129 с. (Тр. ВНИГРИ; Вып. 276).

Смехов Е.М. (ред.) Проблема трещинных коллекторов нефти и газа и методы их изучения.

– Дослідження впливу деформаційних процесів на фільтраційно-ємнісні характеристики глибокозалегаючих карбонатних порід-колекторів є важливим завданням, оскільки дозволить сформувати критерії оцінки скупчень нафти і газу та краще зрозуміти механізми впливу на ці пласти при умові подальшої промислової розробки.

Ленинград: Недра, 1968. 179 с. (Тр. ВНИГРИ; Вып. 264).

Ставрогин А.Н. О влиянии деформации на проницаемость горных пород. *Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры*. Москва: Наука, 1968. С. 156–161.

Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: Наука, 2001. С. 343. 228 ил. ISBN 5-02-024942-4.

Ставрогин А.Н., Юрель Г.Н., Тарасов Б.Г. Механические, фильтрационные и петрографические свойства выбросоопасных и невыбросоопасных песчаников Донбасса. *ФТПРПИ*. 1986. № 2. С. 11–18

Шрейнер Л.А., Байдюк Б.В., Павлова Н.Н. Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах. Москва: Недра, 1968. 358 с.

Adams F.D., Coker E.C. An experimental investigation into the flow of rocks. *Amer. J. Sci.* 1910. Vol. 29, N 74. P. 465.

Boker R. Die Mechanik der bleibenden Formänderung in kristallinisch aufgebauten Körpern. *Ver. deutsch Yngenieur Mitt. Forschungsarbeiten*. 1915. Bd. 175. S. 1–51.

Griggs D.T., Handin I. (Eds). Rocks deformation. *Geol. Soc. Amer. Mem.* 1960. No 79.

Handin I. Strength and ductility. Handbook of Physical constants. *Geol. Soc. Amer. Mem.* 1966. No 97.

Jokobori T. An Interdisciplinary Approach to Fracture and Strength of Solids. Wolters–Noordhoff. scientific. Publications LTD. Groninger, 1965.

References

Adams F.D., Coker E.C., 1910. An experimental investigation into the flow of rocks. *Amer. J. of Sci.*, vol. 29, N 74, p. 465 (in English).

Baidyuk B.V., 1963. Mechanical properties of rocks at high pressures and temperatures. Moscow: Gostoptekhizdat, 102 p. (in Russian).

Bezborodova I.V., 1970. Upper Jurassic carbonate sediments of the central part of the North Caucasus slope (interfluvium of the Baksan–Cherek rivers). *Subject scientific and technical. review «New methods for the study of fractured oil and gas reservoirs»*. Moscow: VNIIOENG, p. 38–51 (in Russian).

- Boker R.**, 1915. Die Mechanik der bleibenden Formänderung in kristallinisch aufgebauten Körpern. *Ver. deutsch Ingenieure Mitt. Forschungsarbeiten*, Bd. 175, S. 1–51 (in German).
- Bridgeman P.V.**, 1935. High pressure physics. Moscow: ONTI (in Russian).
- Dmitriev A.P., Kuzyaev L.S., Protasov Yu.I.**, 1969. Physical properties of rocks at high temperatures. Moscow: Nedra, 160 p. (in Russian).
- Griggs D.T., Handin I.** (Eds), 1960. Rocks deformation. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, No 79 (in English).
- Handin I.**, 1966. Strength and ductility. Handbook of Physical constants. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, No 97 (in English).
- Jokobori T.**, 1965. An Interdisciplinary Approach to Fracture and Strength of Solids. Wolters—Noordhoff. Scientific Publications LTD. Groninger (in English).
- Klochko N.A.**, 1958. The dependence of rocks mechanical properties on temperature. Schreiner L.A. et al. *Mechanical and abrasive properties of rocks*. Moscow: Gostoptekhizdat, Chapter 8, p. 98—104 (in Russian).
- Pavlova N.N.**, 1975. Deformation and reservoir properties of rocks. Moscow: Nedra, 240 p. (in Russian).
- Schreiner L.A., Baidyuk B.V., Pavlova N.N.**, 1968. Deformation properties of rocks at high pressures and temperatures. Moscow: Nedra, 358 p. (in Russian).
- Smekhov E.M.**, 1969. (Ed.) Methods of studying rocks fractures and fractured oil and gas reservoirs. Leningrad: Nedra, 129 p. (Works of All-Russian Oil Research Geological Prospecting Institute; Iss. 276) (in Russian).
- Smekhov E.M.**, 1968. (Ed.) The problem of oil and gas fractured reservoirs and methods for studying them. Leningrad: Nedra, 179 p. (Works of All-Russian Oil Research Geological Prospecting Institute; Iss. 264) (in Russian).
- Stavrogin A.N.**, 1968. On the deformation effect on the rocks permeability. In: *Physical and mechanical properties of rocks in the upper part of the earth's crust*. Moscow: Nauka, p. 156—161 (in Russian).
- Stavrogin A.N., Tarasov B.G.**, 2001. Experimental physics and mechanics of rocks. St.-Petersburg: Nauka, 343 p., 228 ill. ISBN 5-02-024942-4 (in Russian).
- Stavrogin A.N., Yurel G.N., Tarasov B.G.**, 1986. Mechanical, filtration and petrographic properties of outburst and non-hazardous sandstones of Donbas. *FTPRPI*, № 2, p. 11—18 (in Russian).
- Vakarchuk S.G., Dovzhok T.E., Filushkin K.K. [et al.]**, 2013. Unconventional hydrocarbons sources in Ukraine. Prospects for gas resources development of compacted rocks in the Eastern oil and gas region of Ukraine. Book 6. Kyiv, 207 p. (in Ukrainian).

Стаття надійшла
08.04.2019