

УДК 550.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.03>

Олена КРАСНІКОВА, асп.
ORCID ID: 0000-0002-4265-1982
e-mail: koatinga@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Павло КУЗЬМЕНКО, канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0009-0007-0157-9391
e-mail: pavlo.kuzmenko@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Сергій ВИЖВА, д-р геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-4091-6649
e-mail: s.vyzhva@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ІНДЕКСУ КРИХКОСТІ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.В. Шабатурою)

Розглянуто поняття індексу крихкості породи, що широко застосовується для проєктування гідравлічного розриву пласта. Охарактеризовано три основні підходи до його розрахунку: мінералогічний, з використанням пружних властивостей, з використанням даних каротажу. Для кожного з підходів надано характеристику найбільш еживаних методів розрахунку, що були створені для порід з різним мінералогічним складом, із застосуванням різних фізичних властивостей або ж на основі різних емпіричних залежностей. Для двох вибірок ядерного матеріалу теригенних порід Дніпровсько-Донецької западини визначено мінералогічний індекс крихкості за основними петрогенними компонентами двома різними способами та індекс крихкості за пружними властивостями – модулем Юнга та коефіцієнтом Пуассона, кутот внутрішнього тертя. Було проведено порівняльну характеристику результатів, отриманих різними методами, що показала схожість тенденцій щодо літології та петрофізичних властивостей гірських порід. Автори рекомендують для використання при оцінці теригенних колекторів Дніпровсько-Донецької западини мінералогічну методику Жарві, що характеризується високою точністю при простоті застосування.

Ключові слова: ГРП, індекс крихкості, геомеханіка.

Вступ

Постановка проблеми. Методи інтенсифікації видобутку нафти і газу, зокрема гідророзрив пласта (ГРП), стають все більш вагомими у контексті досягнення енергонезалежності. Принципово важливим параметром для успішного ГРП є здатність порід цільового горизонту до утворення тріщин. Одним із ключових параметрів у оцінці даної характеристики є індекс крихкості (ІК). На сьогодні існує значна кількість різноманітних способів обчислення цього параметра на основі різних властивостей гірських порід, тож вибір оптимального методу його розрахунку для конкретної формації чи території є комплексним питанням, який залежить від конкретних геологічних умов, фізико-механічного стану досліджуваного пласта, його складу і повноти вивчення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття продовжує цикл публікацій кафедри геофізики ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка, присвячених застосуванню геофізичних методів при проведенні ГРП та вивченні ущільнених теригенних порід-колекторів, (Краснікова, & Вижва, 2023; Вижва та ін., 2014, 2021; Олійник та ін., 2020; Безродна, & Вижва, 2019).

Поняття крихкості почали розглядати в літературі, пов'язаній з інженерією та механікою, з 60-х років минулого сторіччя (Hetenyi, 1966, Coates, & Parsons, 1966). Протягом останніх 60 років саме визначення крихкості як такої варіювалося. Її описували як відсутність пластичності, як поведінку, яка створює незначну деформацію під час руйнування породи, як появу руйнування на рівні або трохи вище межі текучості, як здатність матеріалу до руйнування без очевидної постійної деформації під час випробувань на розтяг або стиск, як легкість поширення тріщин тощо (Li, Han, & Zhu, 2023). Зауважимо, що у зв'язку з гетерогенністю та анізотропністю гірських порід,

термінологія, яку початково розробляли для таких матеріалів, як метали та кераміка, має застосовуватися в геофізиці з обережністю (Meng, Wong, & Zhou, 2021).

Зазвичай руйнування крихкої породи пов'язане з раптовим падінням напруги, навіть з можливістю розколу уламків породи. Для різних областей геоінженерії у роботі з гірськими породами це руйнування потрібно ефективно контролювати, щоб або сприяти, або стримувати його поширення. Отже, надійне розуміння крихкості може дати важливу інформацію для більш успішного планування проєктів у різних дисциплінах наук про Землю (Wang et al., 2023).

При роботі з нетрадиційними колекторами вуглеводнів та, зокрема, проєктуванні ГРП, індексу крихкості почали надавати увагу з початку ХХІ ст. Першими публікаціями, з присвячених цьому питанню, часто вважають статтю Rickman (2008), що започаткувала один із класичних підходів до обчислення ІК на основі пружних параметрів порід, та статтю Jarvie (2007), що започаткувала мінералогічний підхід.

Окрім використання при плануванні ГРП, індекс крихкості застосовується і в інших областях промислової та інженерної геофізики. Оцінювання крихкості є важливим і при проєктуванні горизонтального буріння (Lei, 2023). Розуміння фізико-механічних властивостей, включаючи крихкість, гранітів та інших магматичних порід в умовах високої температури та високих навантажень, відіграє суттєву роль у підтримці стабільності свердловини та мінімізації витрат на буріння при експлуатації циркулюючих геотермальних систем (Liu et al., 2023; Yin et al., 2022; Xiao et al., 2021). Індекс крихкості застосовується і при видобутку метану з вугільних пластів (Moska, 2021; Wu et al., 2023), а також видобутку корисних копалин у наземних та підземних виробках (Jeong, Choi, & Lee, 2023). В інженерній геофізиці оцінка крихкості важлива

© Краснікова Олена, Кузьменко Павло, Вижва Сергій, 2024

для моніторингу підземних та гідротехнічних споруд (Song et al., 2023; Herza, & Singh, 2022).

Різноманіття областей, що використовують індекс крихкості, привело до створення надзвичайно великої кількості методик його розрахунку. Так, у статті (Meng, Wong, & Zhou, 2021) наводиться більш ніж 80 різних способів отримання ІК. Тому нині через неузгодження у визначенні крихкості та різні сфери застосування не існує міжнародно визнаного стандарту для визначення індексу крихкості порід (Li, Han, & Zhu, 2023).

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Індекс крихкості широко застосовує світова спільнота (Iyare, Blake, & Ramsook 2021; Vaisblat et al., 2022; Va et al., 2021; Rybacki, Meier, & Dresen 2016), зокрема при проектуванні гідророзриву пласта та для інших задач геомеханіки (Moska, 2021; Altindag, 2002), проте в Україні він поки не набув поширення. Існує потреба в аналізі його застосування з урахуванням особливостей, характерних для порід-колекторів ДДЗ, що є переважно пісковиками з пониженими значеннями пористості, які часто характеризуються наявністю кварцового цементу та незначною кількістю з'єднаних між собою пор.

Формулювання цілей статті. Автори ставлять за мету розгляд та оцінку існуючих підходів до розрахунку індексу крихкості та вибір оптимального значення індексу для теригенних порід-колекторів Дніпровсько-Донецької западини.

Результати

Історія впровадження поняття індексу крихкості. У 1966 р. Коутс і Парсонс ввели поняття індексу крихкості породи (Coates, & Parsons, 1966), який визначався як відношення пружної деформації до загальної деформації при руйнуванні. На рис. 1 показано загальну криву напруги та деформації для тривісного стиснення, проведеного до руйнування. Синя лінія показує зміну деформацій від прикладеного напруження у лінійній пружній області. Дотична до кривої в цій області відповідає модулю Юнга. Розрив зразка гірської породи відбувається при τ_{max} , що вказує на міцність породи. Межа текучості

зразка ідентифікується як перетин дотичної кривої в лінійній області з дотичною до τ_{max} , перенесеної на фактичні дані про напруження та деформації. Пружна деформація представлена областю ліворуч ϵ_{el} від межі текучості, а пластична деформація представлена областю праворуч $\epsilon_{tot} = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl}$ від межі текучості, яка обмежена руйнуванням зразка. Нарешті, залишкова міцність породи, τ_{res} , відображається після досягнення пікової напруги. Таким чином, індекс крихкості ІК породи можна задати формулою

$$IK = \frac{\epsilon_{el}}{\epsilon_{tot}}, IK = \frac{\tau_{max} - \tau_{res}}{\tau_{max}} \quad (1)$$



Рис. 1. Крива напруги та деформації (модифіковано за Miskimins, 2019)

Класифікація способів визначення індексу крихкості. Існує три принципово різних підходи до визначення індексу крихкості гірських порід залежно від використаних для обрахунків даних: з використанням даних лабораторних вимірювань пружних параметрів, з використанням даних каротажу та мінералогічний. У межах кожного з цих трьох напрямків за останні десятиліття було розроблено ряд методів та підходів (рис. 2), основні з яких ми розглянемо нижче.



Рис. 2. Класифікація підходів до визначення індексу крихкості (модифіковано за Mews et al., 2019)

Мінералогічний підхід отримання ІК. Класичний мінералогічний підхід до визначення ІК запропоновано (Jarvie et al., 2007). Після дослідження сланців Барнетт, що характеризуються низькими значеннями пористості та проникності, було запропоновано рівняння для оцінки крихкості породи IK_{mnr1} з використанням масових часток її складових:

$$IK_{mnr1} = \frac{Q}{Q + CARB + CLY} \quad (2)$$

де Q – вміст кварцу, $CARB$ – вміст карбонатів, CLY – вміст глини.

Кварц вважають крихким мінералом, тоді як карбонат і глину – менш крихкими і некрихкими відповідно. Це рівняння дає точні результати для формацій, які містять велику кількість кварцу і глини та малий вміст карбонатів. Однак для пластів зі значною кількістю карбонату це рівняння занижує значення індексу крихкості (Mews, Alhubail, & Barati, 2019).

Wang і Gale (2009) запропонували метод визначення IK_{mnr2} на основі мінерального складу гірських порід, який враховує вміст доломіту як внесок у крихкість та доломіт і ТОС як складові мінералів у знаменнику:

$$IK_{mnr2} = \frac{Q+DOL}{Q+DOL+CARB+CLY+TOC}, \quad (3)$$

де Q – кварц, $CARB$ – карбонат, CLY – глина, DOL – доломіт, TOC – total organic carbon.

Також помічено (Jin et al., 2014), що силікатні мінерали, такі як польовий шпат і слюда, є більш крихкими, ніж глина в сланцевих колекторах (формула слюди $X_2Y_4-6Z_8O_{20}(OH,F)_4$; якщо іон X є кальцієм, вона вважається "крихкою" слюдою). Крім доломіту, інші карбонатні мінерали, такі як кальцит у вапняку, також більш крихкі, ніж глина. Отже, пропонується нове вираження крихкості IK_{mnr3} , яке включає силікатні мінерали (кварц, польовий шпат і слюду) і крихкі карбонатні мінерали (кальцит і доломіт):

$$IK_{mnr3} = \frac{QFM+CALC+DOL}{total}, \quad (4)$$

де QFM – кварц+польові шпати+слюда, $CALC$ – кальцит, DOL – доломіт, $total$ – сума.

Підхід отримання ІК на основі пружних властивостей. Існують два загальних методи використання пружних властивостей для встановлення крихкісних властивостей. Це метод крихкості – brittleness method (Rickman et al., 2008) та метод ламкості – fracability method (Goodway, Varsek, & Abaco, 2006). Тріщиностійкість (fracture toughness) та її роль при проведенні гідророзриву протягом багатьох років викликала численні дискусії (Miskimins, 2019).

Обидва ці методи використовують зв'язок між пружними модулями гірської породи та її здатністю до утворення тріщин. Вважається, що більш крихка порода матиме вищий модуль Юнга E та нижчий коефіцієнт Пуассона, що полегшує ініціювання та поширення тріщин як природних, так і індукованих. На цьому твердженні ґрунтується підхід Рікмана. Підхід Гудвея базується не лише на модулі Юнга та коефіцієнті Пуассона, а й на використанні констант Ламе λ і μ . В однорідних і ізотропних матеріалах λ є константою нестисливості і характеризує опір породи розширенню руйнування. Константа жорсткості μ , описує стійкість породи до деформації зсуву.

Параметр тріщиностійкості дає змогу оцінити міцність зразка гірської породи при утворенні тріщини за умови, що в ньому уже присутня тріщина. Оскільки в геологічному середовищі поширені тріщини природного походження, цей параметр є важливим для оцінки взаємодії природних та спричинених ГРП тріщин.

Низьке значення ІК вказує на те, що матеріали зазнають крихкого руйнування, тоді як високі значення є сигналом пластичності. Отже, фації з низьким коефіцієнтом Пуассона, низькою тріщиностійкістю та ІК й високим модулем Юнга зазвичай є найкращими кандидатами для гідралічного розриву.

Наведемо формулу Рікмана:

$$IK_{ela1} = \frac{1}{2} * \left(\frac{E-E_{min}}{E_{max}-E_{min}} + \frac{v-v_{min}}{v_{max}-v_{min}} \right), \quad (5)$$

де E – модуль Юнга, v – коефіцієнт Пуассона.

Одним із найпростіших способів вираження індексу крихкості IK_{ela2} у лабораторних умовах є

$$IK_{ela2} = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}, \quad (6)$$

де σ_c і σ_t – міцність на одноосьове стиснення і міцність на розтяг за бразильським тестом відповідно (Meng et al., 2021).

Бразильський тест – це непрямий метод випробування для визначення міцності на розрив крихких матеріалів, таких як бетон, гірська порода тощо. У цьому тесті тонкий круглий диск діаметрально стискається до руйнування. Стиснення викликають розтягальні напруження по нормалі до вертикального діаметра, які є по суті постійними в області навколо центру. Непряма міцність

на розтяг зазвичай розраховується на основі припущення, що руйнування відбувається в точці максимальної напружки на розтяг, тобто в центрі диска (Li, & Wong, 2012).

Інший спосіб теж пов'язаний зі співвідношенням цих показників IK_{ela3} :

$$IK_{ela3} = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}, \quad (7)$$

Оскільки σ_c і σ_t є двома основними механічними параметрами, які можна легко отримати під час звичайних лабораторних випробувань, вищезгадані методики набули широкого використання. Однак вони мають кілька недоліків. По-перше, фізичне значення для двох індексів не відображає процес руйнування породи. По-друге, цей метод більше підходить для опису міцності гірської породи, ніж її крихкості. Крім того, порода з різними значеннями σ_c і σ_t може мати однаковий коефіцієнт, а діапазон його варіації є вузьким.

У розрахунках IK_{ela4} використовується і кут внутрішнього тертя ϕ , що визначається як кут кривої Мора при нульовому напруженні. Вважається, що більш крихкі породи характеризуються вищим значенням кута:

$$IK_{ela4} = \sin\phi. \quad (8)$$

Підхід отримання ІК на основі каротажних даних. Способи розрахунку ІК за допомогою каротажних даних були запропоновані для характеристики нетрадиційних покладів сланцевого газу та пошуку пластів-кандидатів на гідророзрив (Meng, Wong, & Zhou, 2021).

Пара коефіцієнтів, розрахованих за допомогою швидкостей P- і S-хвиль навколо свердловини, відповідно, виражаються як

$$IK_{Vp} = \int_{r=R}^{+\infty} \frac{\Delta Vp(r)}{R} dr, \quad (9)$$

$$IK_{Vs} = \int_{r=R}^{+\infty} \frac{\Delta Vs(r)}{R} dr, \quad (10)$$

де R – радіус свердловини; Vp і Vs – швидкості P- і S-хвиль відповідно; ΔVp і ΔVs – варіації швидкостей P- і S-хвиль відповідно, і отримані за допомогою томографії часу проходження P-хвилі та інверсії S-хвилі диполя.

Вважається, що породи з високою крихкістю мають тенденцію генерувати велику кількість мікротріщин на стінці свердловини під час буріння свердловини, що призведе до великої зміни швидкості радіальної пружної хвилі.

У літературі широко представлені емпіричні рівняння для окремих формацій та регіонів, що дають змогу визначити ІК за каротажними даними. Наприклад, для сланців Барнетт виведено залежності (Mews, Alhubail, & Varati, 2019):

$$IK_{log1} = -1,4956 \times NPHI + 0,9763, \quad (11)$$

$$IK_{log2} = -0,01104 \times DTC + 1,4941, \quad (12)$$

де $NPHI$ – нейтронна пористість, DTC – час проходження акустичної хвилі.

Визначення індексів крихкості для порід Дніпровсько-Донецької западини. Розрахунки ІК здійснювалися для двох вибірок зразків гірських порід.

Перша вибірка представлена зразками теригенних порід (рис. 3) родовища північної частини Дніпровсько-Донецької западини, відібраних із глибин до 4500 м. Породи представлені пісковиками та аргілітами із вмістом карбонатів до 17,5 % та пористістю до 10 %.

Аналіз мінералогічного складу було проведено для 20 зразків з вибірки. Мінералогічні ІК (Jarvie ІК та Jin ІК відповідно) розраховано за методиками Jarvie та Jin (формули 2 та 4). Результат для обох методів має високу збіжність (рис. 4). За рахунок невисокого вмісту карбонатів у зразках метод Jarvie має задовільну точність,

незважаючи на його відносну простоту. На рис. 5 маємо змогу оцінити, що тренди залежностей для обох методів зберігаються, незважаючи на різницю в абсолютних значеннях ІК. Варто зазначити, що різниця у значеннях ІК більша 0,1 спостерігається для зразків із підвищеним вмістом карбонатів.

Розрахунок пружних і механічних параметрів у лабораторних умовах проводився для 15 зразків, кут внутрішнього тертя було розраховано для 3 зразків. ІК розраховувався за методами Rickman та з використанням кута внутрішнього тертя (формули 5 і 8). Отримані результати мають

достатньо стійкий зв'язок з пружними параметрами порід (рис. 6). Коефіцієнт кореляції між індексом крихкості та швидкостями повздовжніх хвиль близький до 0,8, що вказує на відносно стійку залежність між цими параметрами. Значення коефіцієнта детермінації $\sim 0,64$ дає змогу вважати прийнятною якість взаємозв'язку.

Результати розрахунків для методик мають високу збіжність (рис. 7). Коефіцієнт детермінації $> 0,9$ зазвичай свідчить про стійкість взаємозв'язку між параметрами, проте через невеликий розмір вибірки не можна зробити однозначних висновків.

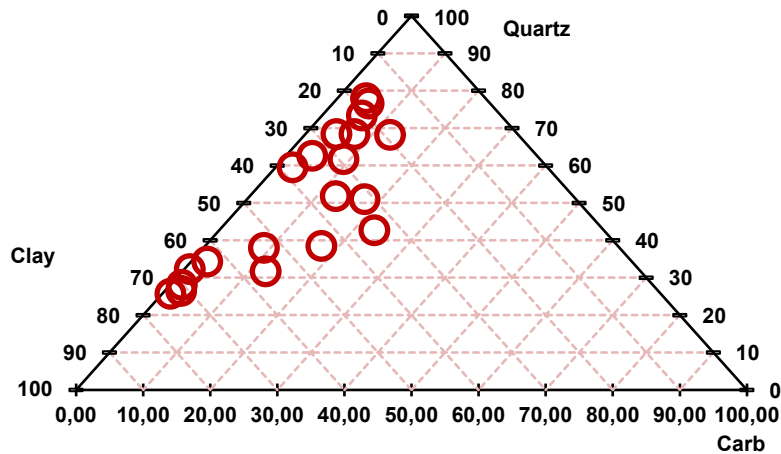


Рис. 3. Діаграма мінерального складу вибірки 1

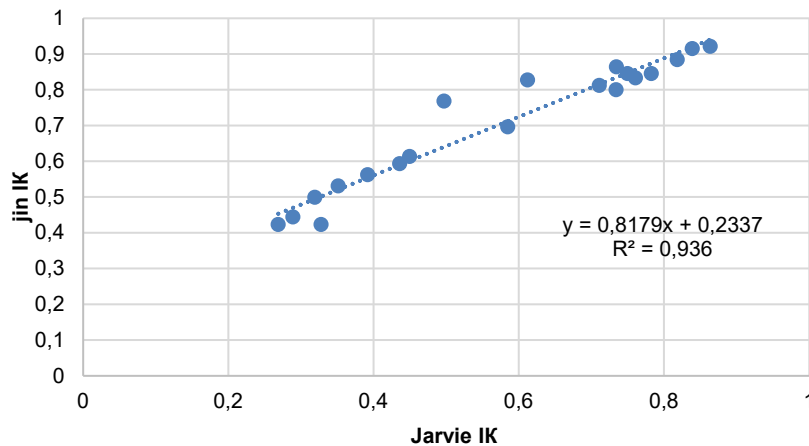


Рис. 4. Результат розрахунків мінералогічного ІК за різними методиками

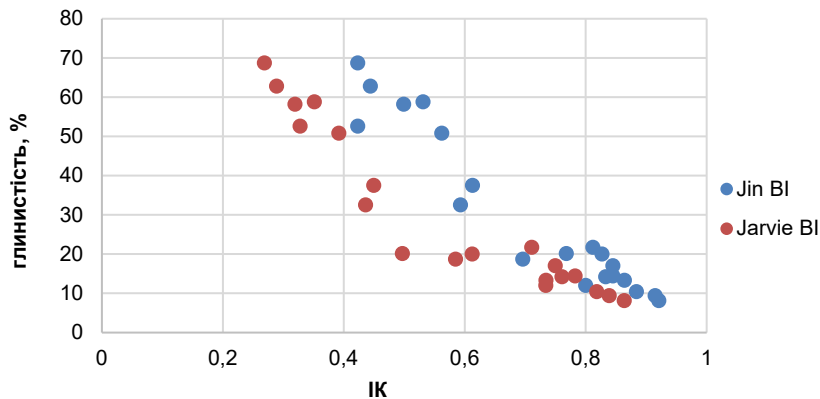


Рис. 5. Залежності мінералогічних ІК від глинистості

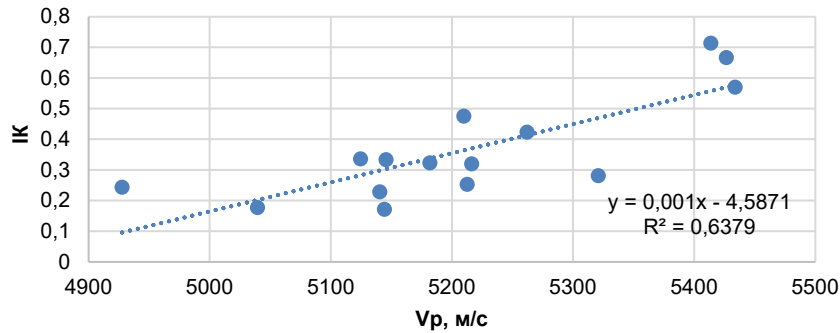


Рис. 6. Залежність між ІК та швидкостями повздовжніх хвиль

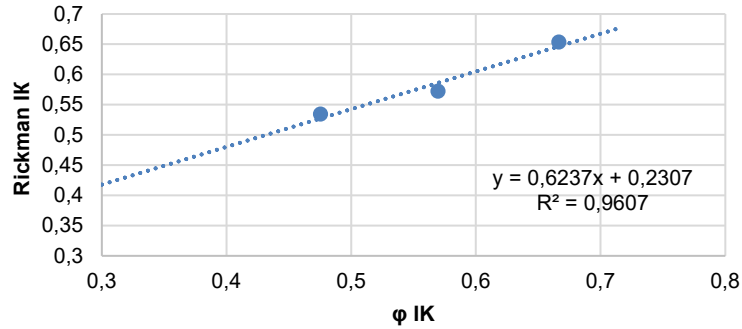


Рис. 7. Порівняння ІК за методикою Рікмана та кутом внутрішнього тертя

Друга вибірка представлена зразками теригенних порід (рис. 8) родовища, розташованого в південно-східній частині Дніпровсько-Донецької западини, відібраних із глибин до 3500 м. Породи представлені здебільшого грубо- та середньозернистими пісковиками та аргілітами, характеризуються невеликим вмістом карбонатів (менше 15 %), пористість коливається від 7 до 16 %.

Аналіз мінералогічного складу було проведено для 79 зразків з вибірки, мінералогічний ІК розраховано за методикою Jarvie (рис. 9).

Розрахунок пружних і механічних параметрів у лабораторних умовах проводився для 23 зразків, ІК було

розраховано за методом Rickman (рис. 10). Порівнюючи мінералогічний та еластичний ІК, варто звернути увагу на те, що пористість, що має істотний вплив на пружні параметри, не враховується у розрахунках за методом Jarvie. Тому за наявності спільного тренду у параметрах все ж спостерігаються розбіжності.

Порівнюючи результати для двох вибірок, можемо побачити спільний тренд для залежності від глинистості в обох вибірках (рис. 11), адже для теригенних порід саме параметр глинистості пов'язаний із пластичністю, що, у свою чергу, відповідатиме меншій здатності до крижкої деформації і, відповідно, утворенню тріщин.

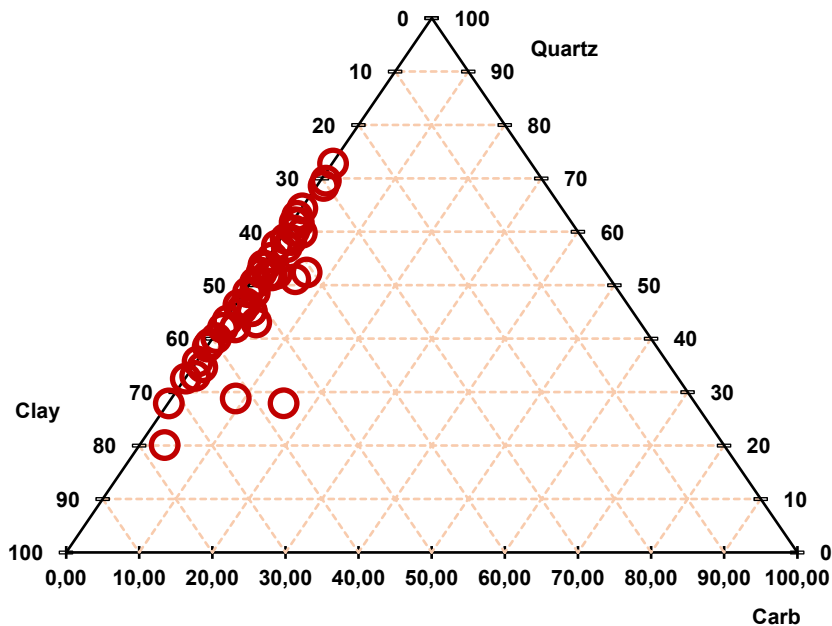


Рис. 8. Діаграма мінерального складу вибірки 2

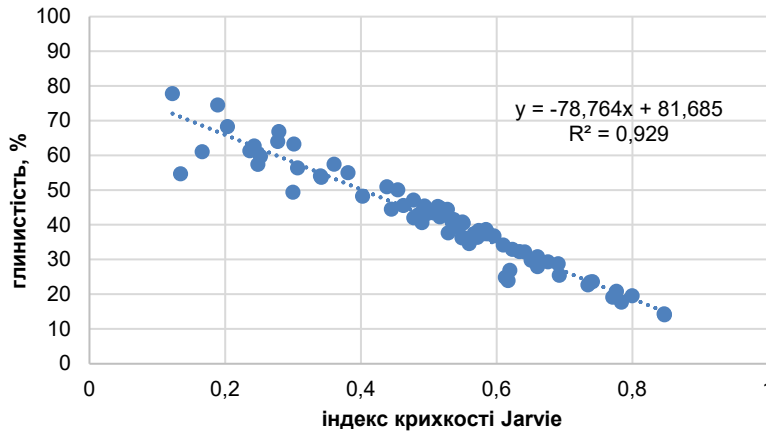


Рис. 9. Залежність мінералогічного ІК від глинистісті

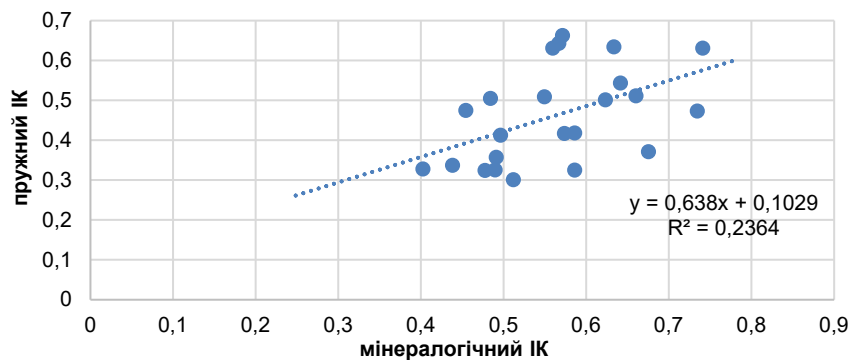


Рис. 10. Залежність між мінералогічним та пружним ІК

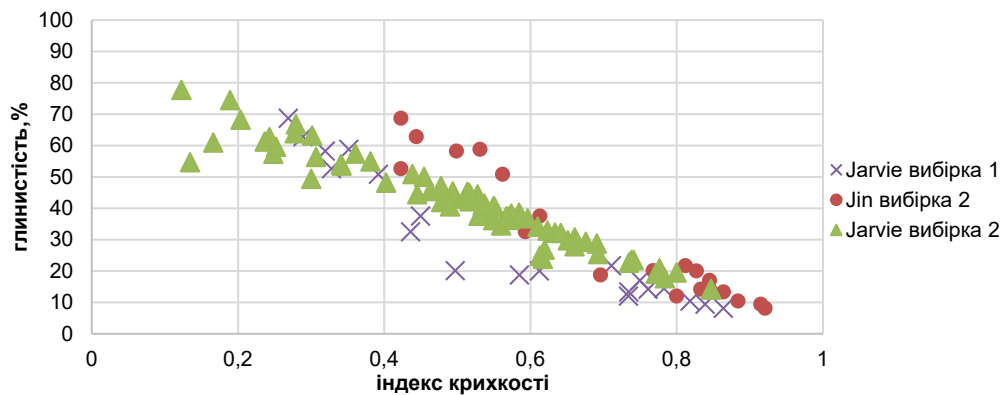


Рис. 11. Залежності мінералогічних ІК для двох вибірок від глинистісті

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, зазначимо, що найстійкіший результат отримано за методикою Jarvie. Низькі коефіцієнти пористості та карбонатності досліджуваних теригенних порід ДДЗ відповідають оптимальним характеристикам для його застосування. Також серед мінералогічних ІК його розрахунок є відносно простим, адже за вхідні дані потребує лише результати геохімічного аналізу основних петрогенних елементів і не включає, наприклад, ТОС. Це дає змогу оперувати більшою вибіркою зразків при аналізі їхніх властивостей.

Для теригенних порід, досліджених авторами, найважливішим є параметр глинистісті, який відповідає за здатність порід до пружної деформації і має обернену залежність від коефіцієнта крихкості.

Відзначимо, що на крихкість чинять вплив не лише властивості самої породи, але й умови, в яких перебуває порода (тиск і температура, диференціальні напруження тощо) (Rybacki, 2016). Дослідження потребують і

текстурно-структурні особливості порід, адже в реальному геологічному середовищі у ІК може проявлятися анізотропність. Тому цікавими виявилися результати порівняння залежностей ІК для двох вибірок, адже відхилення від тренду можуть бути пов'язані з фізико-механічним станом самого пласта.

Варто зазначити, що поняття "індекс крихкості" є узагальнюювальним терміном, що поєднує в собі методи оцінки здатності матеріалів до утворення тріщин, що розроблені спеціалістами з різних дисциплін для різних задач. Тому не варто підходити до зіставлення результатів, отриманих за різними методами, кількісно, важливою є якісна порівняльна оцінка трендів властивостей.

Дискусія і висновки

Проведено аналіз існуючих методів розрахунку індексу крихкості, серед яких особливо увагу було приділено мінералогічному та пружному підходу, розглянуто переваги та обмеження методів. Для теригенних порід з

північної та південно-східної частин Дніпровсько-Донецької западини проведено розрахунок та порівняльний аналіз індексів крихкості різними методами: Jarvie, Jin, Rickman, кута внутрішнього тертя. Автори рекомендують метод Jarvie як найбільш відповідний та одночасно простий у використанні. Зазначимо, що робота з індексами крихкості потребує попереднього аналізу літології та петрофізичних параметрів порід, оскільки більшість методів розрахунку розробляється для конкретної формації чи регіону і може показувати недостовірні результати для порід з відмінними межами фізичних характеристик. Також варто пам'ятати, що утворення тріщини при ГРП – це процес, що залежить не лише від складу та властивостей порід, тож індекси крихкості можна використовувати лише в комплексі з іншими геомеханічними параметрами та враховуючи умови, в яких перебуває цільовий горизонт.

Внесок авторів: Олена Краснікова – концептуалізація, формальний аналіз, методологія, написання (оригінальна чернетка); Павло Кузьменко – формальний аналіз; Сергій Вижва – валідація даних, написання (перегляд і редагування).

Список використаних джерел

- Безродна, І., & Вижва, С. (2019). Аналіз акустичних властивостей порід-колекторів Рунівщинської площі на основі петрофізичних досліджень в різних баричних умовах. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(86), 21–26. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.86.03>
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, І.І., & Онищук, Д.І. (2014). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геофізичний журнал*, 36, 1, 145–157. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i1.2014.116163>
- Вижва, С.А., Онищук, В.І., Орлюк, М.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., & Шабатура, О.В. (2021). Електричні та пружні параметри ущільнених порід східної частини північної приобтової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(95), 25–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.03>
- Краснікова О., & Вижва С. (2023). Формування швидкісної моделі і теоретичні основи методів визначення гіпоцентру мікросейсмічної події при проведенні гідророзриву пласта. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 101(2), 38–42. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.101.05>
- Олійник, О., Антонюк, В., Безродна, І., & Вижва, С. (2020). Аналіз особливостей покладів газу ущільнених порід-колекторів та літолого-петрофізична оцінка відкладів верхнього та середнього карбону Святогірської площі. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(89), 89–95. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.12>
- Altindag, R. (2002). The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hold drills. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 102, 61–66.
- Ba, J., Hu, P., Tan, W., Müller, T., & Fu, L. (2021). Brittle mineral prediction based on rock-physics modelling for tight oil reservoir rocks. *Journal of Geophysics and Engineering*, 18, 970–983. <https://doi.org/10.1093/jge/gxab062>
- Coates, D., & Parsons, R. (1966). Experimental Criteria for Classification of Rock Substances. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 3(3), 181–189. <https://doi.org/10.4095/300105>
- Goodway, B.V., Varsek, J., & Abaco, C. (2006). Practical Application of P-Wave AVO for Unconventional Gas Resource Plays: Seismic Petrophysics and Isotropic AVO. *The Recorder*, 31, 90–95.
- Herza, J., & Singh, R. (2022). Considerations for brittleness in tailings. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 32, 7–11. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.32.0007>
- Hetenyi, M. (1966). Handbook of experimental stress analysis. USA: Wiley.
- Iyare, U., Blake, O., & Ramsook, R. (2021). Fracability evaluation of the upper Cretaceous Naparima Hill Formation, Trinidad. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109599. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109599>
- Jarvie, D., Hill, R., Ruble, T., & Pollastro, R. (2007). Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin – AAPG BULL.*, 91, 475–499. <https://doi.org/10.1306/121906060608>
- Jeong, H., Choi, S., & Lee, Y.-K. (2023). Evaluation of Cutting Performance of a TBM Disc Cutter and Cerchar Abrasivity Index Based on the Brittleness and Properties of Rock. *Applied Sciences*, 13(4):2612. <https://doi.org/10.3390/app13042612>
- Jin, X., Shah, S., Roegiers, & J.-C., Zhang, B. (2014). Fracability Evaluation in Shale Reservoirs – An Integrated Petrophysics and Geomechanics Approach. *SPE Journal*, 20. <https://doi.org/10.2118/168589-MS>
- Lei, W., Liu, X., Ding, Y., Xiong, J., & Liang, L. (2023). The investigation on shale mechanical characteristics and brittleness evaluation. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49934-0>

- Li, D., Han, M., Zhu, Q. (2023). Evaluation of Rock Brittleness Index under Dynamic Load. *Appl. Sci.*, 13, 4698. <https://doi.org/10.3390/app13084698>
- Li, D., & Wong, L.N.Y. (2013). The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights. *Rock Mech. Rock Eng.*, 46, 269–287. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0257-7>
- Liu, Z., Wang, C., Zhang, M. et al. (2023). Cracking property and brittleness evaluation of granite under high-temperature true triaxial compression in geothermal systems. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 9, 99. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00631-2>
- Meng, F., Wong, L.N., & Zhou, H. (2021). Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 13, 221–247. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.008>
- Mews, K.S., Alhubail, M.M., & Barati, R.G. (2019). A Review of Brittleness Index Correlations for Unconventional Tight and Ultra-Tight Reservoirs. *Geosciences*, 9(7), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070319>
- Miskimins, J. (2019). Hydraulic fracturing: fundamentals and advancements Society of Petroleum Engineers.
- Moska, R. (2021). Brittleness index of coal from the Upper Silesian Coal Basin. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 91–101. <https://doi.org/10.13168/AGG.2021.0007>
- Rickman, R., Mullen, M.J., Petre, J.E. et al. (2008). A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, September 2008*. <https://doi.org/10.2118/115258-MS>
- Rybacki, E., Meier, T., & Dresen, G. (2016). What controls the mechanical properties of shale rocks? Part II: Brittleness. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 144, 39–58.
- Song, Zx., Zhang, Jw., Zhao, Sk. et al. (2023). Brittleness of layer sandstone under triaxial loading and unloading. *J. Cent. South Univ.*, 30, 2234–2251. <https://doi.org/10.1007/s11771-023-5372-y>
- Vaisblat, N., Harris, N.B., Ayranci, K., Chalaturnyk, R., & Power, M. (2022). Rock Compositional Control on Geomechanical Properties of the Montney Formation, Western Canadian Basin. *SSRN Electronic Journal*.
- Wang, F.P., & Gale, J.F. (2009). Screening criteria for shale-gas systems. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 59, 779–793.
- Wang, J., Du, J., Li, W. et al. (2023). Brittleness index evaluation of gas-bearing sandstone under triaxial compression conditions. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 9, 160. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00713>
- Wu, D, Li, B, Wu, J, Hu, G, Gao, X, & Lu, J. (2023). Influence of Mineral Composition on Rock Mechanics Properties and Brittleness Evaluation of Surrounding Rocks in Soft Coal Seams. *ACS Omega. Dec.*, 29;9(1):1375–1388. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07731>. PMID: 38222615; PMCID: PMC10785081
- Xiao, W., Zhang, D., Yang, H., Yu, B., & Li, S. (2021). Evaluation and analysis of sandstone brittleness under the influence of temperature. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8. <https://doi.org/10.1007/s40948-021-00324-8>
- Yin, T., Ma, J., Wu, Y. et al. (2022). Effect of high temperature on the brittleness index of granite: an experimental investigation. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 81, 476. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02953-z>

References

- Altindag, R. (2002). The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hold drills. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 102, 61–66.
- Ba, J., Hu, P., Tan, W., Müller, T., & Fu, L. (2021). Brittle mineral prediction based on rock-physics modelling for tight oil reservoir rocks. *Journal of Geophysics and Engineering*, 18, 970–983. <https://doi.org/10.1093/jge/gxab062>
- Bezrodna, I., & Vyzhva, S. (2019) Analysis of the acoustic properties of the reservoir rocks of the Runovshchynska area on the basis of petrophysical studies in different baric conditions *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(86), 2–26. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.86.03> [in Ukrainian].
- Coates, D., & Parsons, R. (1966). Experimental Criteria for Classification of Rock Substances. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 3(3), 181–189. <https://doi.org/10.4095/300105>
- Goodway, B.V., Varsek, J., & Abaco, C. (2006). Practical Application of P-Wave AVO for Unconventional Gas Resource Plays: Seismic Petrophysics and Isotropic AVO. *The Recorder*, 31, 90–95.
- Herza, J., & Singh, R. (2022). Considerations for brittleness in tailings. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 32, 7–11. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.32.0007>
- Hetenyi, M. (1966). Handbook of experimental stress analysis. USA: Wiley.
- Iyare, U., Blake, O., & Ramsook, R. (2021). Fracability evaluation of the upper Cretaceous Naparima Hill Formation, Trinidad. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109599. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109599>
- Jarvie, D., Hill, R., Ruble, T., & Pollastro, R. (2007). Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin – AAPG BULL.*, 91, 475–99. <https://doi.org/10.1306/121906060608>
- Jeong, H., Choi, S., Lee, Y.-K. (2023). Evaluation of Cutting Performance of a TBM Disc Cutter and Cerchar Abrasivity Index Based on the Brittleness and Properties of Rock. *Applied Sciences*, 13(4):2612. <https://doi.org/10.3390/app13042612>

- Jin, X., Shah, S., Roegiers, and J.-C., & Zhang, B. (2014). Fracability Evaluation in Shale Reservoirs -An Integrated Petrophysics and Geomechanics Approach. *SPE Journal*, 20. <https://doi.org/10.2118/168589-MS>
- Krasnikova, O., & Vyzhva, S. (2023). Velocity model creation and theoretical basics of the methods of determining the hypocenter of a microseismic event while performing hydraulic fracturing. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 101(2), 38–2. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.101.05> [in Ukrainian].
- Lei, W., Liu, X., Ding, Y., Xiong, J., & Liang, L. (2023). The investigation on shale mechanical characteristics and brittleness evaluation. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49934-0>.
- Li, D., Han, M., & Zhu, Q. (2023). Evaluation of Rock Brittleness Index under Dynamic Load. *Appl. Sci.*, 13, 4698. <https://doi.org/10.3390/app13084698>
- Li, D., & Wong, L.N.Y. (2013). The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights. *Rock Mech. Rock Eng.*, 46, 269–287. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0257-7>
- Liu, Z., Wang, C., Zhang, M. et al. (2023). Cracking property and brittleness evaluation of granite under high-temperature true triaxial compression in geothermal systems. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 9, 99. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00631-2>
- Meng, F., Wong, L.N., & Zhou, H. (2021). Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 13, 221–247. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.008>
- Mews, K.S., Alhubail, M.M., & Barati, R.G. (2019). A Review of Brittleness Index Correlations for Unconventional Tight and Ultra-Tight Reservoirs. *Geosciences*, 9(7), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070319>
- Miskimins, J. (2019). Hydraulic fracturing: fundamentals and advancements Society of Petroleum Engineers.
- Moska, R. (2021). Brittleness index of coal from the Upper Silesian Coal Basin. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 91–101. <https://doi.org/10.13168/AGG.2021.0007>
- Oliinyk, O., Antoniuk, V., & Bezrodna, I. (2020). Analysis of tight gas reservoirs and lithological-petrophysical assessment of upper and middle Carboniferous strata of Svyatogorska area. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(89), 89–95. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.12> [in Ukrainian].
- Rickman, R., Mullen, M.J., Petre, J.E. et al. (2008). A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, September 2008*. <https://doi.org/10.2118/115258-MS>
- Rybacki, E., Meier, T., & Dresen, G. (2016). What controls the mechanical properties of shale rocks? Part II: Brittleness. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 144, 39–58.
- Song, Zx., Zhang, Jw., Zhao, Sk. et al. (2023). Brittleness of layer sandstone under triaxial loading and unloading. *J. Cent. South Univ.*, 30, 2234–2251 <https://doi.org/10.1007/s11771-023-5372-y>
- Vaisblat, N., Harris, N.B., Ayranci, K., Chalaturnyk, R., & Power, M. (2022). Rock Compositional Control on Geomechanical Properties of the Montney Formation, Western Canadian Basin. *SSRN Electronic Journal*.
- Vyzhva, S., Mykhaylov, V., & Onyshchuk, I. (2014). Petrophysical parameters of rocks from the areas of eastern sector of the Dnieper-Donets depression promising for shale gas. *Geofizichnyi zhurnal*, 36, 145–157. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i1.2014.116163> [in Ukrainian].
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Orlyuk, M., Onyshchuk, I., Reva, M., & Shabatura, O. (2021). Electric and elastic parameters of carbonic period terrigenous rocks of the eastern part of the northern edge of the dnipro-donets depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(95), 25–33 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.95.03>
- Wang, F.P., & Gale, J.F. (2009) Screening criteria for shale-gas systems. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 59, 779–793.
- Wang, J., Du, J., Li, W. et al. (2023) Brittleness index evaluation of gas-bearing sandstone under triaxial compression conditions. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 9, 160. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00713>
- Wu, D, Li, B, Wu, J, Hu, G, Gao, X, & Lu, J. (2023). Influence of Mineral Composition on Rock Mechanics Properties and Brittleness Evaluation of Surrounding Rocks in Soft Coal Seams. *ACS Omega. Dec.*, 29;9(1):1375–1388. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07731>. PMID: 38222615; PMCID: PMC10785081
- Xiao, W., Zhang, D., Yang, H., Yu, B., & Li, S. (2021). Evaluation and analysis of sandstone brittleness under the influence of temperature. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8. <https://doi.org/10.1007/s40948-021-00324-8>
- Yin, T., Ma, J., Wu, Y. et al. (2022). Effect of high temperature on the brittleness index of granite: an experimental investigation. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 81, 476. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02953-z>

Отримано редакцією журналу / Received: 08.11.23
Прорецензовано / Revised: 26.12.23
Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Olena KRASNIKOVA, PhD Student
ORCID ID: 0000-0002-4265-1982
e-mail: koatinga@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Pavlo KUZMENKO, PhD (Geol.), Accos. Prof.
ORCID ID: 0009-0007-0157-9391
e-mail: pavlo.kuzmenko@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Serhii VYZHVA, DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-4091-6649
e-mail: vsa@univ.net.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE METHODS OF DETERMINING THE BRITTLENESS INDEX AND THEIR APPLICATION FOR TERRIGENOUS RESERVOIR ROCKS OF THE DNIPRO-DONETSK BASIN

The article discusses the concept of the rock brittleness index, which is widely used for the design of hydraulic fracturing. Three main approaches to its calculation (mineralogical, using elastic properties, using log data) are characterized. For each of the approaches, the characteristics of the most used calculation methods, which were created for rocks with different mineralogical composition, using different physical properties or based on different empirical dependencies, are given. For two sets of core material samples of terrigenous rocks of the Dnipro-Donetsk Basin, the mineralogical index of fragility according to the main petrogenic components was determined by two different methods and the brittleness index according to elastic properties – Young's modulus and Poisson's ratio, the angle of internal friction. A comparative characteristic of the results obtained by different methods was carried out, which showed the similarity of trends in lithology and petrophysical properties of rocks. The authors recommend the Jarvie mineralogical method, which is characterized by high accuracy and ease of use, for use in evaluating terrigenous reservoirs of the Dnipro-Donetsk Basin.

Keywords: hydraulic fracturing, brittleness index, geomechanics.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.