

Ю.И. Войтенко, д.т.н.

Украинский государственный геологоразведочный институт

В.Г. Кравец, д.т.н., проф.

НТУУ «КПИ» имени Игоря Сикорского

В.В. Коробийчук, д.т.н., проф.

Государственный университет «Житомирская политехника»

О синергетике поведения горных пород в условиях горного и пластового давления

В публикации рассмотрены элементы структуры, масштабный эффект, вид напряженно-деформированного состояния и их влияние на прочность горной породы. Также изучено влияние насыщающих флюидов и вида напряженно-деформированного состояния на прочность горной породы и ее диспергирование. Определено влияние динамических воздействий на прочность и структурные изменения. Диссипация энергии в твердом теле происходит только при возникновении сдвиговых напряжений с образованием деформированного состояния. При этом время релаксации энергии определяется суммой времен действия и деформационного последствия после прохождения импульса, а время релаксации импульса соразмерно со временем действия динамической нагрузки. Поэтому время релаксации энергии намного превышает время релаксации импульса.

При отсутствии внешнего воздействия на горные породы в окрестности выработки состояние геологической среды определяется величиной горного и пластового давлений, в частности соотношением компонент тензора напряжений, а при наличии жидкости в выработке (скважине) – также величиной ее давления. Дисперсия прочности горной породы и условие ее предельного равновесия определяется соотношением «размер выработки–размер макротрещины или множества трещин в ее окрестности», видом насыщающего флюида и видом напряженно-деформированного состояния в горном массиве. При внешнем слабом, по сравнению с потенциальной энергией пласта, динамическом воздействии на хрупкие и квазихрупкие горные породы (взрыв, удар, проникание) в зависимости от параметров воздействия в окрестности выработки или пробитого отверстия, кроме макротрещин, образуются диссипативные структуры в виде мельчайших трещин на микро- и мезоуровне. Они в последствии под действием горного давления и соответствующих насыщающих жидкости или газа формируют зоны диспергирования и каналы для притока пластовых флюидов к скважине, увеличивая проницаемость горной породы и обеспечивая нелинейное, постепенное во времени увеличение продуктивности скважины.

Ключевые слова: горная порода; динамическое воздействие; прочность; структурные изменения горной породы; напряженно-деформированное состояние.

Введение. В конце прошлого столетия появилась теория, которая объяснила и описала закономерности протекания неравновесных процессов и самоорганизации сложных систем [1, 2]. Авторы назвали ее синергетикой. При этом согласно [2] одна из общих физических теорий – термодинамика – является составной частью синергетики. Согласно новой теории биологическим, социальным, химическим, физическим неравновесным процессам свойственны фазовые переходы, отвечающие особым точкам – точкам бифуркации, по достижению которых спонтанно изменяются свойства среды. При этом происходит самоорганизация диссипативных структур (ДС) с характерным размером L_i^{DC} . Этот процесс контролируется стремлением открытых систем к снижению производства энтропии \dot{S} . При этом может быть реализовано два сценария: производство энтропии уменьшается во время масштабных фазовых переходов (МФП), а энтропия S не меняется; МФП сопровождаются скачками \dot{S} и S . При этом в случае первого сценария выполняется условие $L_{i-1}^{DC} / L_i^{DC} = L_i^{DC} / L_{i+1}^{DC}$. Если сформулированное условие не выполняется, то происходит скачкообразное изменение параметров, определяющих поведение системы. Например, скачком изменяется прочность горной породы (ГП), чувствительность взрывчатого материала, химический состав смеси материалов и т. п. Закономерности распространения трещин в конструкционных материалах, движение горных пород вокруг выработок в процессах разрушительного деформирования под действием горного давления можно объяснить с позиций основного принципа синергетики [3, 4]. Синергетика и фрактальная геометрия позволяют анализировать процессы образования осадочных комплексов, возникновения и развития в них флюидонасыщенных зон дилатансии [5].

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Поровое пространство ГП и физико-химические процессы на поверхностях пор могут быть охарактеризованы с помощью фрактальной геометрии [6]. Распределение микротрещин в твердом теле в докритической стадии разрушения и в области вершины трещины в закритической стадии вероятней всего подчиняется законам фрактальной геометрии. Нелинейное поведение материалов при деформировании и разрушении, резкое изменение их свойств в критических точках самоорганизации связаны также с кинетическими фазовыми переходами [7]. Ярким примером кинетических фазовых переходов является взаимодействие металлов между собой и с неметаллами в ударных волнах с образованием новых химических соединений и выделением дополнительной энергии [8]. Снижение прочности и увеличение ее дисперсии в горных породах в окрестности подземной выработки, являющиеся наряду с горным давлением причинами неустойчивости, разрушительного деформирования пород и динамических явлений, связано с ростом количества дефектов и трещин на разных иерархических уровнях. Последние работы в области физики и механики землетрясений показали, что закономерности подготовки, протекания и последствия этого явления определяются в основном двумя фундаментальными принципами: иерархической структурой сейсмоактивных областей и концепцией самоорганизованной критичности в точках бифуркации [9]. В вопросе о влиянии динамических воздействий на прочность и структурные изменения горных пород остается до сих пор много пробелов.

Цель исследования – анализ возможности применения достижений современной физики и химии твердого тела для описания поведения горных пород при совместном действии жидкости, или газа, горного и пластового давлений, а также внешнего динамического воздействия.

Материалы и методы исследования. *Элементы структуры, масштабный эффект, вид напряженно-деформированного состояния (НДС) и их влияние на прочность ГП.* Известно, что ГП являются преимущественно неупругими средами, поведение которых при деформировании описывается широкодиапазонными уравнениями состояния [10, 11]. Разнообразие этих свойств объясняется тем, что ГП является средами со структурой. Структурными элементами, которые определяют их физико-механические свойства ГП в природных условиях залегания, являются зерна, поры и трещины на разных структурных уровнях: от нано- до макропор и трещин. Распределение элементов структуры в ГП имеет вероятностный характер и изменяется в пространстве и во времени. Поэтому в инженерной практике это распределение не учитывают, а исследуют механические свойства ГП с позиций механики сплошной среды, либо применяют специальные методы структурного анализа и моделирования для учета распределения микротрещин и их влияния на механические характеристики ГП [11, 33–48]. Для описания поведения ГП при деформировании используют упругие, упругопластические или реологические модели. Наряду с этим многочисленные экспериментальные результаты исследований структуры, деформирования и разрушения ГП, динамические явления в подземных выработках свидетельствуют о том, что поведение ГП подчиняется законам синергетики деформируемого твердого тела и механики разрушения [7, 10–14]. Покажем на ряде примеров зависимость прочности ГП от вида НДС и вида элементов структуры с учетом достижений механики разрушения. На рисунке 1 показаны известные механизмы неупругого деформирования кристаллических ГП при сдвиге и сжатии [15]. Зоны микроразрушений и смятия в углах соседних кристаллов на рисунке 1, b не показаны. Но именно с ними связаны характер деформирования и разупрочнение пород, а также диссипация энергии при объемных статических и динамических нагружениях. Поскольку уровень контактных напряжений в задаче Герца (рис. 1, c) выше, чем напряжения сухого трения (рис. 1, a, b), то понятно, почему прочность при сжатии превышает прочность на сдвиг. Кроме того, схема деформирования (рис. 1, c) показывает, что при одинаковой величине деформации сжатия вначале разрушаются зерна из высокомодульных минералов с малыми радиусами кривизны. В качестве второго и третьего рассмотрим плоские задачи о прочности твердого тела с цилиндрическим отверстием и трещиной:

- при действии внутреннего давления p на стенки отверстия диаметром $2R$ и трещины глубиной l ;
- при воздействии на бесконечности от отверстия сдвиговых напряжений τ в условиях чистого сдвига.

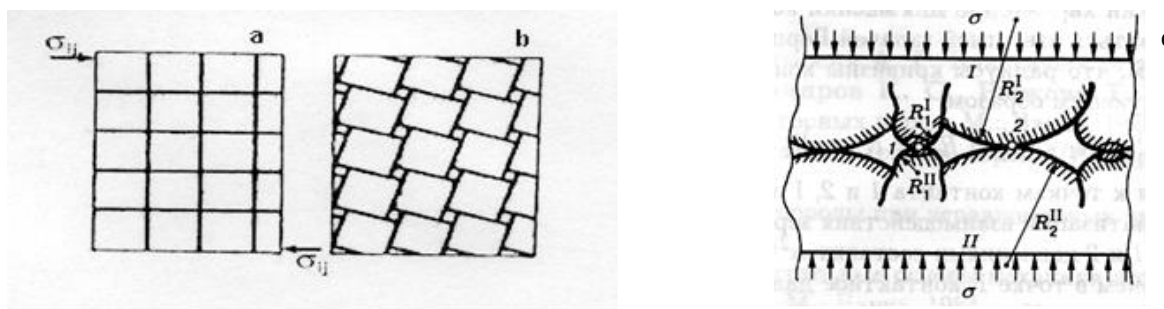


Рис. 1. Механизмы неупругого деформирования горных пород при сдвиге (a, b) и сжатии (c)

Первая задача и ее решение позволяет определить условия предельного равновесия ГП вокруг поры или скважины в случае внутреннего давления p жидкости или газа. Вторая из этих задач реализуется в случае, когда длинная горизонтальная выработка находится в поле сжимающих напряжений в одной плоскости и растягивающих в другой. В реальных горно-геологических условиях этот случай приближается к сформулированной задаче, если одна из компонент горного давления, например вертикальная, значительно превышает другую, горизонтальную, или наоборот. Согласно известным решениям этих задач прочность ГП с цилиндрическим отверстием и трещиной на его стенке непрерывно уменьшается с увеличением величины l/R . В случае второй задачи прочность описывается функцией $K_{11} = \tau\sqrt{\pi} l F_{11}$. До величины $l/R < 1$ функция F_{11} возрастает ($dF_{11}/dl > 0$), а при $l/R > 1$ $dF_{11}/dl < 0$ [16]. При $l/R = 1$ $dF_{11}/dl = 0$. K_1, K_{11} – коэффициенты интенсивности напряжений в вершинах трещин отрыва и поперечного сдвига. Условие предельного равновесия ГП с трещиной для небольших глубин $K_1 = K_{1C}, K_{11} = K_{11C}$ (K_{1C}, K_{11C} – вязкость разрушения ГП). При этом обычно $K_{11C} > K_{1C} \approx (0,3...0,5) K_{11C}$. Эти примеры показывают, что дисперсия прочности зависит не только от размеров трещин, но и от вида напряженно-деформированного состояния (НДС) ГП.

Присутствие начальных напряжений в виде горного давления еще более усложняет зависимость прочности ГП от вида и размеров начальных трещин и соотношений между компонентами тензора напряжений [15, 17, 18]. Для этого случая энергетический критерий разрушения, например, критерий типа Гриффитса-Ирвина, содержащий K_1, K_{11}, K_{111} , зависит от начальных напряжений [18]. В силовых критериях разрушения коэффициенты интенсивности напряжений K_1, K_{11}, K_{111} не зависят от начальных напряжений для случая «свободных» трещин. В то же время вязкость разрушения $K_{1C}, K_{11C}, K_{111C}$ из соображений физического характера может зависеть от начальных напряжений. При сжатии вдоль существующей системы природных или техногенных трещин, или вдоль напластований условие предельного равновесия описывается специальными соотношениями, приведенными, например в монографии [18] (том 4). Анализ этих соотношений, как и критерия типа Гриффитса-Ирвина для ГП с начальными напряжениями для оценки их прочности, выходит за пределы этой работы и является предметом отдельного исследования. Но эти примеры показывают, что дисперсия прочности зависит не только от размеров трещин и их положения в горном массиве, но и от вида напряженно-деформированного состояния (НДС) ГП, присутствия или отсутствия начальных напряжений, их величины, давления в порах ГП и т. п.

В качестве последнего примера рассмотрим влияние мельчайших трещин на дисперсию прочности ГП в выбросоопасных объектах, например в угольном или песчаном выбросоопасных пластах. Согласно работе [19] вероятность выброса увеличивается, если одна из трещин под действием напряжений в зоне опорного давления (за счет разгрузки со стороны забоя) и внутрипластового давления газа увеличивается до размеров магистральной трещины, соизмеримой с мощностью пласта. Однако предельное состояние углепородного массива в зоне опорного давления и в целиках определяется не только количеством и длиной магистральных трещин, но и количеством мельчайших трещин в массиве. Их количество, как показывают многочисленные опыты с образцами твердых сред с регистрацией сигналов акустической эмиссии, растет с увеличением нагрузки.

На рисунках 2, 3 показан один из наиболее вероятных вариантов формирования будущей трещины отрыва в зоне опорного давления или в выбросоопасном песчанике в виде групп микротрещин с характерным размером L_i^{DC} . Нижний индекс обозначает стадии образования диссипативных структур, размеры и количество которых зависят от уровня действующих напряжений, размеров структурных элементов, наличия минеральных включений разной жесткости. Кроме того, на рисунке 3, а показаны качественные зависимости дисперсии прочности ГП от соотношения L_i^{DC}/L_0 , предложенные в [7], где левые кривые соответствуют рисункам 3, б–д, а правые – другим возможным комбинациям скоплений микротрещин и макротрещин. При этом наиболее энергетически выгодный хрупкий механизм разрушения определяется критериями [7, 12, 13]:

$$R_{кр} = \sigma_{II} / \sqrt{2} \quad \tau_{II} \leq 1 / \sqrt{2}; \quad (1)$$

$$\sigma_{\perp} / \sigma_{II} = 0...0,3, \quad (2)$$

где σ_{II}, τ_{II} – прочность ГП на разрыв и на сдвиг.

Разрушение и выброс угля или песчаника произойдет при выполнении условия (1) и при таком соотношении L_i^{DC}/L_0 , когда прочность ГП будет минимальной в соответствии с рисунком 3, а. При этом, согласно (2), чем меньше отношение указанных компонент тензора напряжений, тем большая энергия объемного деформирования аккумулирована в выбросоопасном пласте в результате негидростатичности НДС ГП.

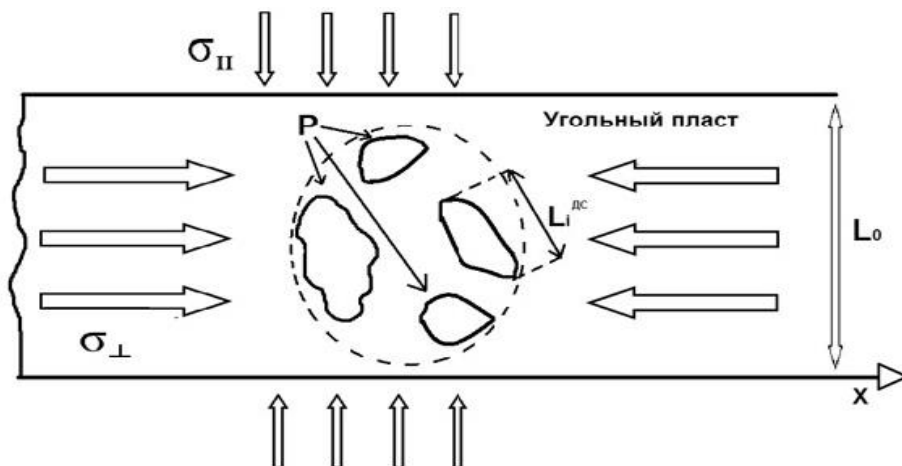


Рис. 2. Схема образования магистральной трещины в угольном пласте из нескольких скоплений микродефектов

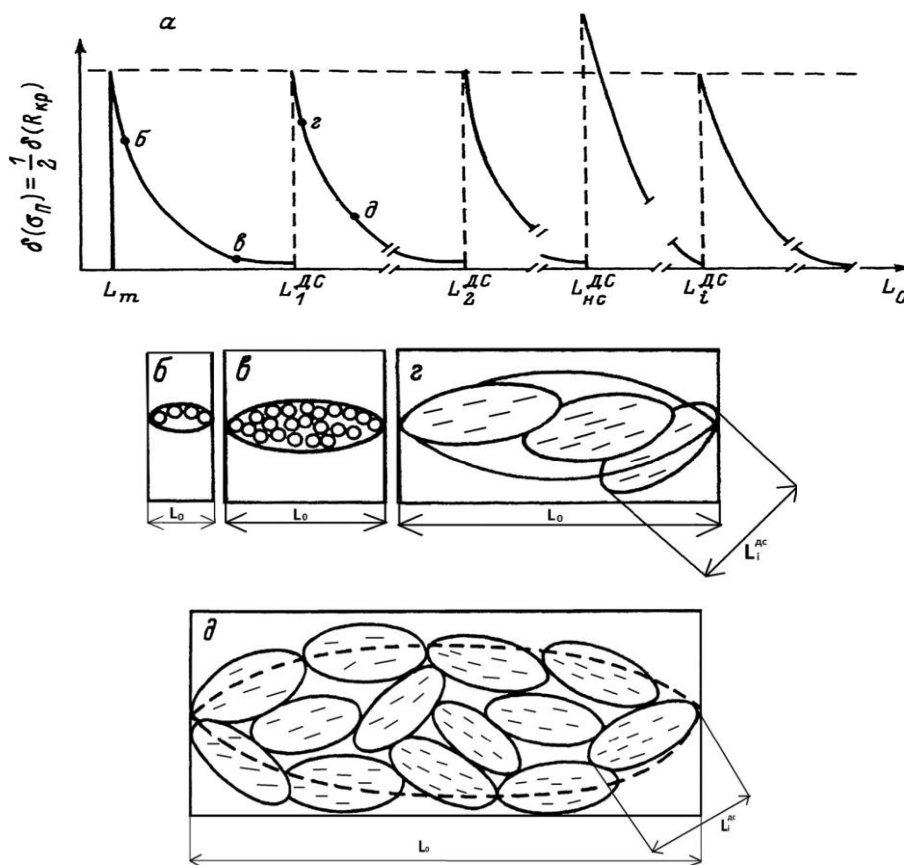
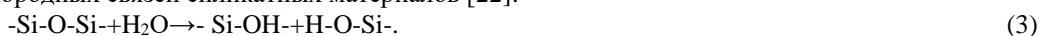


Рис. 3.: а – дисперсия прочности угольного пласта в зависимости от соотношения $L_{i\text{ДС}} / L_0$; б–д – схемы образования диссипативных структур в пластах песчаника (б–в) и угля (г–д)

Влияние насыщающих флюидов и вида НДС на прочность ГП и ее диспергирование. В [20–22] показано, что вода и ее растворы способствуют диспергированию почти непроницаемых напряженных пород, относящихся к упруго-хрупким. При этом термодинамическая активность воды существенно зависит как от количества, так и от химической природы растворенных в ней компонентов. Экспериментально было показано, что небольшое количество (0,05–0,1 %) растворенных в воде щелочных силикатных нанокластеров может на несколько порядков увеличить диспергирующую активность воды для ГП вследствие действия механических внешних напряжений. В основе механохимического диспергирования горных пород с участием воды лежит механизм разрушения кремний-кислородных связей силикатных материалов [22]:



Применяемые при кислотных обработках композиции растворяют карбонатный цемент и матрицу ГП (НСІ). Силикатные компоненты полиминеральных ГП растворяет плавиковая кислота (HF). При этом имеет значение давление нагнетания и напряжения в породе-коллекторе. Интенсификацию различных физико-химических процессов под действием механических напряжений наблюдали, например, авторы работ [15] (интенсификация массообменных процессов), [23] (интенсификация коррозионных процессов). В экспериментах, описанных в [21], было установлено, что при сжатии гранодиорита в течение месяца произошло диспергирование образца практически на 10 %. При этом нанотрещины с начальными размерами 10–100 нм разрослись до трещин, размеры которых изменялись от микрометров до долей миллиметра.

Влияние водорода. При отдельных видах термобарохимического воздействия на породу-коллектор ее обрабатывают атомарным и молекулярным водородом [24]. Влияние водорода на зарождение и развитие трещин в металлах достаточно изучено и обобщено в монографии [23].

Существуют гипотезы и теоретические концепции о механизме влияния водорода на разрушение, которые связывают облегчение разрушения материалов с одним (или несколькими) из следующих факторов:

- 1) давление молекулярного водорода в микрополостях;
- 2) обусловленная водородом декогезия (ослабление межатомного сцепления) в кристаллической решетке материала;
- 3) взаимодействие атомов водорода в материале с дислокациями;
- 4) химическое взаимодействие водорода с компонентами сплавов и выделение водородосодержащих фаз (гидридов и т. п.);
- 5) поверхностное воздействие (хемосорбция) в системе материал–водород (среда).

Каждая из гипотез предполагает ответственным за облегчение разрушения металлов («охрупчивание») обычно лишь один из названных факторов, однако условия, при которых он может стать действительно определяющим, не оговаривает. Заметим, что для горных пород наиболее важны первые три и пятый факторы. А при наличии самородных металлических включений – все перечисленные факторы.

Основное отличие разрушения металлов и горных пород при водородном охрупчивании от линейной механики разрушения (например, модели Гриффитса- Ирвина) заключается в наличии трех стадий состояния трещины, в то время как в указанной модели только две: стадия нераспространения трещины при $K_I < K_{Ic}$ и стадия распространения при $K_I \geq K_{Ic}$ ($K_I \geq K_{ID}$). При водородном охрупчивании согласно [23] есть стадия неподвижной трещины $K_I \leq K_{Iusc}$, стадия докритического роста трещины при $K_{Iusc} < K_I < K_{Icn}$, стадия закритического роста трещины при $K_I \geq K_{Icn}$, когда распространение трещины при таком распределении водорода в системе обеспечивается чисто механическим фактором – уровнем нагружения – и не предполагает какого-либо перераспределения водорода. Это состояние трещины аналогично состоянию ее развития при статических испытаниях в обычных условиях. При этом соответствующий критический параметр K_{Icn} по физическому смыслу близок к характеристике обычной предельной кратковременной статической трещиностойкости K_{Ic} .

В формулах записаны также следующие обозначения:

K_I – коэффициент интенсивности напряжений (КИН) в вершине трещины разрыва;

K_{ID} – динамическая трещиностойкость горной породы в случае динамического разрушения;

K_{Iusc} – пороговое значение КИН для обусловленного водородом докритического роста трещины.

Поскольку докритический рост трещины происходит медленно, то при большой скорости выделения водорода возможно развитие нескольких трещин в этой стадии, о чем свидетельствуют результаты опытов по разрушению образцов карбонатной породы после обработки водородом в режиме одноосного сжатия на испытательной машине «Инстрон» (рис. 4).

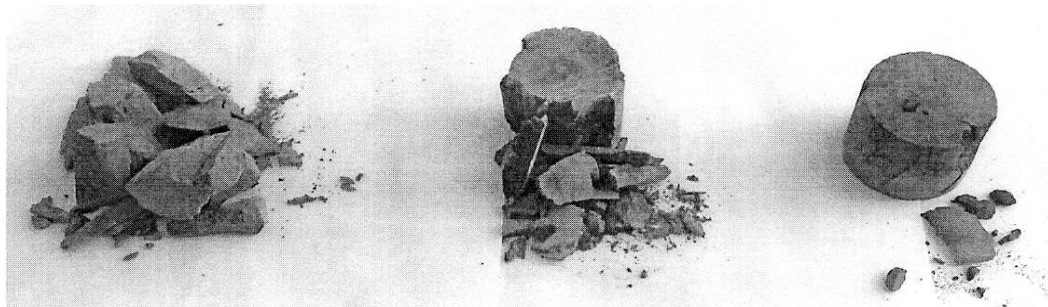


Рис. 4. Образцы карбонатных кернов, подвергшихся обработке водородом и механическому разрушению (левый образец был обработан горячим (атомарным) водородом; средний – обработан холодным, молекулярным; правый – не обрабатывался)

Однако водородное воздействие не ограничивается только этим механизмом разрушения. С учетом малости атомов H^+ и молекул H_2 и их диффузионной способности, они заполняют дислокации и нанотрещины (скопления дислокаций) впереди магистральных микро- и макротрещин, а также в их стенках, создавая зоны предразрушения в породе. При достаточно большой скорости выделения газа он способен расширять существующие микро- и нанотрещины, производя объемное разуплотнение породы и снижение ее прочности. На больших глубинах залегания (3–5 км) энергии одного водорода недостаточно для развития макротрещин, поэтому используется комплексное термобарохимическое воздействие на породу-коллектор, в котором водород играет роль активатора процессов диффузии на микро- и наноуровне [24]. С учетом современных представлений о синергетической природе эффектов от совместных воздействий на породу для плотных коллекторов газа перспективным является комплексное динамическое воздействие с одновременным или последующим водородным охрупчиванием.

Кроме физико-химических свойств жидкости, которая насыщает ГП, первостепенное значение имеет вид напряженно-деформированного состояния, который действует в ом объекте. Он определяет направление и количество трещин. В экспериментах [21] показано, что сначала диспергируется сеткой микротрещин плагиоклаз, а затем кварц, биотит, апатит, роговая обманка и др. В образцах с частичным разрушением вдоль магистральной трещины сдвига образовалась сеть микротрещин разрыва размерами от долей до 2 мм. Характерно, что вначале разрушаются высокомодульные материалы, а затем материалы с меньшими модулями упругости. Аналогичная закономерность наблюдается при динамическом, взрывном деформировании полиминеральных ГП [25].

Влияние динамических воздействий на прочность и структурные изменения. Известно, что диссипация энергии в твердом теле происходит только при возникновении сдвиговых напряжений с образованием ДС. При этом время релаксации энергии определяется суммой времен действия и деформационного последствия после прохождения импульса, а время релаксации импульса соразмерно со временем действия динамической нагрузки. Поэтому время релаксации энергии намного превышает время релаксации импульса. В [7] показано, что кумуляция подводимой извне энергии в локализованных областях обусловлена различием времен релаксации энергии τ_ε и импульса τ_p , причем

$$\tau_p = \frac{a}{c_t} \ll \tau_\varepsilon = \frac{a}{c_a} = \tau_p \cdot c_t / c_a = \tau_p \Lambda_0, \quad (4)$$

где c_t – скорость поперечных волн деформации; $c_a = h / 2ma$, где m и a – масса атома и межатомное расстояние; h – постоянная Планка.

Оценки с использованием этих соотношений показывают, что при относительно малых нагрузках $\sigma > \sigma_{кр} = 0,5\rho c_a \sim 1$ МПа, в частности для кварца $\sigma_{кр} \approx 3,0 - 10,0$ МПа, происходит образование локализованных неравновесных областей, в которых рассеивается энергия и образование ДС в виде нанотрещин и микротрещин при увеличении нагрузки (рис. 1, а–с). Практически уже при малых нагрузках начинается отклонение динамического режима деформирования большинства горных пород от упругого. Это подтверждают многочисленные экспериментальные данные, полученные задолго до появления работы [7] и обобщенные в [15]. Эти экспериментальные результаты позволили сформулировать следующий вывод: при динамическом неравномерном сжатии аномальное поведение ГП, связанное с развитием поперечных и сдвиговых деформаций, начинается при давлениях σ^* , составляющих первые проценты от прочности на сжатие σ_0 . Величина σ^* зависит от неравномерности напряженного состояния породы ζ , генерируемого импульсом давления. При $\zeta = \sigma_3 / \sigma_1 \rightarrow 0$ (σ_3, σ_1 – минимальное и максимальное напряжения) она может составлять 3–5 процентов от разрушающего напряжения σ_0 . При этом отношение масштабов ДС соседних структурных уровней согласно [7]:

$$\Lambda_1 = \frac{L_{t+1}^{ДС}}{L_1^{ДС}} = \frac{L_t}{L_s} = \frac{C_1^2}{C_s^2} = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}, \quad (5)$$

где L_t, L_s – характерные масштабы, в которых рассеивается энергия объемного деформирования и сдвига; C_1, C_s – скорость продольного и поперечного звука; ν – коэффициент Пуассона.

Для среднего значения коэффициента Пуассона $\nu = 0,3$ формула (5) дает значение $\Lambda_1 = 3,5$. Для некоторых ГП параметр Λ_1 близок к расчетному. Например, отношение размеров зоны радиальных трещин к размеру зоны дробления разных горных пород – $\approx 3,9-4,1$; зоны предразрушения R_{np} к радиусу зоны радиальных трещин R_{np} в песчанике, так же как и зоны дилатансии к R_{np} , составляет $\approx 2-4$ [10, 14, 15].

Поэтому соотношение (5) может быть использовано для оценки размеров зон разуплотнения и предразрушения при наличии экспериментальных данных о зоне радиальных трещин в ГП. По мнению автора работы [15] длительный эффект повышения проницаемости пород-коллекторов вокруг скважины при слабых взрывных воздействиях (до 5–6 лет) обеспечивается их необратимой объемной деформацией. Однако, вероятней всего, длительный эффект сохранения повышенной продуктивности скважины обеспечивается не только дилатансионным разуплотнением ГП, но и синергетическим действием пластового и горного давлений, которые поддерживают степень разуплотнения ГП, как и раскрытые макротрещины, особенно в условиях негидростатического характера НДС. Оба упомянутые эффекты

разуплотнения ГП происходят при определенных параметрах: скоростях нагружения не менее 10^9 – 10^{10} Па/с и скоростях деформации $\geq 10^3$ – 10^4 с⁻¹, которые можно считать точками бифуркации при изменении параметров нагружения. Изложенные выше результаты относятся к монолитным породам. В них с увеличением глубины в условиях высоких давлений и температур формируется вторичная пористость и трещиноватость. В напряженных ГП на глубинах ≥ 1000 м подрастание существующих микро- и макротрещин возможно только в поле динамических напряжений сдвига. На малых глубинах залегания возможно подрастание имеющихся трещин по механизму разрыва при выполнении двух условий: достаточная амплитуда кольцевых растягивающих напряжений и достаточное время действия этих напряжений [17].

Кроме ДС разного масштаба и различной природы (рис. 1, а–с; 2; 3) при глубокой статической депрессии на пласт в окрестности открытого ствола скважины и кончика перфорационного отверстия самопроизвольно образуются короткие макротрещины под действием касательных напряжений, превышающих прочность ГП на сдвиг [26]. Расчет по упругой модели с использованием формул для напряжений задачи Ляме показывает, что для песчаника с прочностью на сдвиг 66–77 МПа этот эффект проявляется, начиная с глубины ≈ 3000 м. При глубокой депрессии на пласт в некоторой области, близкой к скважине, выполняется также условие $\zeta = \sigma_3 / \sigma_1 = 0 \dots 0,3$ (σ_3 – минимальное, σ_1 – максимальное напряжения в тензоре) [27]. Это вместе с величиной критической нагрузки $\sigma_* = (0,4-0,6)\sigma_{пр}$ ($\sigma_{пр}$ – предельное напряжение сжатия) обеспечивает условие дилатационного разуплотнения даже при статическом режиме нагружения. Под действием горного давления в условиях насыщения водой, пластовым флюидом или технологическими жидкостями происходит постепенное диспергирование частично нарушенных микротрещинами ГП. Об изменении фильтрационных свойств ГП свидетельствуют примеры нефте- и газопроявлений по истечении определенного времени в различных скважинах, в том числе законсервированных [28]. Породы-коллекторы – песчаники и алевролиты пористостью 6–9 % [28]. Известны многочисленные примеры, когда слабые физические воздействия, в частности взрывные, обеспечивали промышленные притоки нефти и газа на глубинах от $H \approx 1200$ м до 7000 м. Моделирование глубинных взрывов показывает, что в таких условиях ($H \geq 3000$ м) размеры радиальных трещин не превышают несколько радиусов скважины [29]. Зона дробления при этом вообще отсутствует. Однако продуктивность скважин аномально увеличивается [17, 30, 31]. (табл. 1). Обработанные пласты представлены терригенными песчаными породами пористостью 6–12 %.

Это можно объяснить только синергетическим действием перечисленных выше факторов, в том числе внешним динамическим, или комплексным химико-механическим воздействием на пласт (табл. 1). В пользу этого говорит также постепенное во времени нарастание продуктивности обработанных скважин (рис. 5) и сравнение энергии импульсного (скважинного) воздействия, соизмеримого с внутренней удельной энергией пласта [32]. В тоже время скорость нарастания продуктивности, по видимому, зависит от пластовых параметров [17, 30].

Таблица 1

Результаты испытаний технологий повышения продуктивности скважин с использованием малогабаритных торпед

| Недро-пользователь | № скважины | Место-рождение | Интервал, м | Тип скважины | Дебит до воздействия м ³ /сутки / т/сутки | Дебит после воздействия м ³ /сутки / т/сутки |
|-------------------------|------------|----------------|------------------------|------------------|--|---|
| ОАО «Укрнафта» | 42 | Талалайское | 3579–3596 | газоконденсатная | 100/0 | 26000/7 |
| -“- | 104 | Анастасивское | 4484–4491 | нефтегазовая | 0/0,3 | 30000/75 (рис. 5) |
| ПАО «Укргаз-вдобування» | 109 | Абазивское | 4611–4616 | газовая | 1000 | 30000 |
| -“- | 24 | Матвиивское* | 3445–3450 | нефтегазовая | 0,0/0,1 | 15000/15 |
| -“- | 79 | Котельва* | 4614–4618 4602–4606 | газовая | 0,1 | 17000 |
| -“- | 58 | Яблунивское | 4942–4951 | -“- | 4500 | 50000 |
| -“- | 103 | Ланнивское | 3314–3318 | -“- | 3000 | 45000 |
| -“- | 60 | Скоробагатько | 3660–3667 | -“- | 0,0 | 20000 |

*торпедирование в химически активной жидкости

По нашему мнению, концепция синергетического поведения ГП, находящихся в условиях совместного воздействия перечисленных выше факторов, является универсальной и объясняет не только нелинейные эффекты повышения продуктивности скважин при слабых физических и химических воздействиях, но и многие явления, сопровождающие горное производство, в частности, динамические процессы в шахтах и рудниках. Она может быть весьма полезной для анализа формирования и определения областей структурной неоднородности ГП в подземных формациях. Это становится особенно актуально в связи с изменениями климата и необходимостью декарбонизации атмосферы планеты. И один из способов решения этой глобальной проблемы – закачивание CO_2 в глубокие геологические формации.

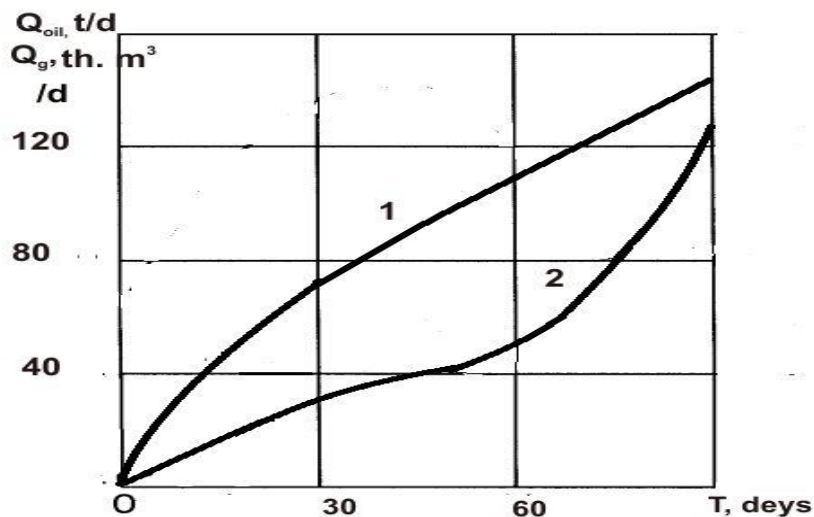


Рис. 5. Динамика изменения продуктивности скважины № 104 Анастасивского месторождения после обработки; 1 – продуктивность по нефти; 2 – продуктивность по газу

Выводы:

1. При отсутствии внешнего воздействия на ГП в окрестности выработки состояние геологической среды определяется величиной горного и пластового давлений, в частности соотношением компонент тензора напряжений, а при наличии жидкости в выработке (скважине) также величиной ее давления. Дисперсия прочности ГП и условие ее предельного равновесия определяется соотношением «размер выработки–размер макротрещины или множества трещин в ее окрестности», видом насыщающего флюида и видом НДС в горном массиве;

2. При внешнем слабом, по сравнению с потенциальной энергией пласта, динамическом воздействии на хрупкие и квазихрупкие ГП (взрыв, удар, проникание) в зависимости от параметров воздействия в окрестности выработки или пробитого отверстия (кроме макротрещин) образуются диссипативные структуры в виде мельчайших трещин на микро- и мезоуровне, которые в последствии под действием горного давления и соответствующих насыщающих жидкостей или газа формируют зоны диспергирования и каналы для притока пластовых флюидов к скважине, увеличивая проницаемость ГП и обеспечивая нелинейное, постепенное во времени увеличение продуктивности скважины.

Список использованной литературы:

1. Fuller R.B. Synergetics / R.B. Fuller. – N. Y. : MacMillan, 1982. – 350 p.
2. Haken G. Synergetics / G.Haken. – M. : Mir, 1980. – 400 p.
3. Mikhaluk A.V. Pulsed rupture of rocks / A.V. Mikhaluk, Yu.I. Voitenko. – Kiev : Nayk. dumka, 1991. – 204 p.
4. Distant interaction of rock mass clusters around underground opening / V.Griniov, L.Zakharova, I.Diedich, V.Nazymko // Mining of Mineral Deposits. – 2017. – Vol. 11, № 2. – P. 79–83.
5. Starostina V.I. Synergetics in Geology / V.I. Starostina, S.S. Sherbakov, D.R. Sakys [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.sciencedirect.com/science/journal/18725791>.
6. Khlyupin A.N. Fractal Analysis of the 3D Microstructure of Porous Materials / A.N. Khlyupin, O.Yu. Dinariev // Technical Physics. – 2015. – Vol. 60, № 6. – P. 805–819.
7. Balankin A.S. Self-organization and dissipative structures in the deformed body / A.S. Balankin // Technical Physics Letters. – 1990. – Vol. 16, № 7. – P. 14–20.
8. Peculiarities of brittle and ductile materials destruction and deformation during the explosion of industrial shaped charges / Yu.Voitenko, V.Kravets, A.Shukurov, O.Drachuk // Mining of Mineral Deposits. – Vol. 11, № 2. – P. 12–20.

9. *Mykuljak S.V.* Hierarchical block model for earthquakes / *S.V. Mykuljak* // PHYSICAL REVIEW E 97, 062130. – 2018. – P. 1–7.
10. *Rodionov V.N.* Fundamentals of geomechanics / *V.N. Rodionov, I.A. Sizov, V.M. Tsvetkov.* – М. : Nedra, 1986. – 306 p.
11. Quantification of microcrack characteristics and implications for stiffness and strength of granite / *L.Griffiths, M.J. Heap, P.Baud, J.Schmittbuhl* // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2017. – № 100. – P. 138–150.
12. *Vojtenko Yu.I.* On fracturing of brittle and ductile rocks by impact and explosion / *Yu.I. Vojtenko, O.V. Kovtun* // Herald of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Series : Mining. – 2016. – Vol. 30. – P. 36–48.
13. *Kochetkov S.I.* About the causes of spontaneous combustion of coals / *S.I. Kochetkov, Yu.I. Voitenko* // Mineralni resursy Ukrainy. – 2017. – № 4. – P. 11–14.
14. *Kochanov A.N.* Wave prefracturing of solid rocks under blasting / *A.N. Kochanov, V.N. Odintsev* // Journal of Mining Science. – 2016. – Vol. 52, № 6. – P. 1080–1089.
15. *Mikhalyuk A.V.* Dilatancy and its influence on the properties of rocks under pre-limiting dynamic loads / *A.V. Mikhalyuk.* – Kiev : Vipol, 2001. – 102 p.
16. *Savruk M.P.* Fracture Mechanics and strength of materials : In Handbook of 4 vol. / *M.P. Savruk* // UkrSSR Physico-mech. in-t. – Kiev : Nauk. dumka, 1988. – Vol. 2: Stress intensity factors in cracked bodies. – 619 p.
17. *Vojtenko Yu.I.* Physical and technical bases of borehole geotechnologies with controlled fracturing : diss. ... Doctors of Engineering : spec. 05.15.11 / *Yu.I. Vojtenko.* – Kiev, 2000. – 377 p.
18. *Guz A.N.* Nonclassical problems of fracture mechanics : 4 vol. / *A.N. Guz* // Ukrainian Academy of Sciences, Institute of Mechanics. – Kiev, 1991. – Vol. 2: Brittle fracture of materials with initial stresses. – 288 p.
19. *Feldman E.* Evolution of cracks in selvedge of the coal bed during its stationary working / *E.Feldman, N.Kalugina, O.Chesnokova* // Mining of Mineral Deposits. – 2017. – Vol. 11. – № 2. – P. 41–45.
20. *Ivanova N.I.* The study of the microcracks of mechanically stressed quartz diorite in the presence of aqueous phases / *N.I. Ivanova* // Physico-chemical mechanics and lyophilic disperse systems. – К. : Nauk. dumka, 1981. – Vol. 13. – P. 111–114.
21. *Ivanova N.I.* The effect of the liquid phase in the formation of cracks in structures mechanically strained quartz diorite / *N.I. Ivanova, B.S. Kogan, N.V. Pertsov* // Doklady Akad. Geology. – 1981. – Vol. 259, № 6. – P. 1423–1428.
22. Physicochemical geomechanic and nanochemical processes in natural and technogenic minerals / *V.A. Prokopenko, I.G. Kovzun, Z.R. Ulberg et al.* // Visn. National Academy of Sciences of Ukraine. – 2018. – № 2. – P. 83–96.
23. *Panasjuk V.V.* Fracture Mechanics and strength of materials : Handbook of 4 vol. / *V.V. Panasjuk, A.E. Andreikiv, V.Z. Parton* // UkrSSR Physico-mech. in-t. – Kiev : Nauk. dumka, 1988. – Vol. 1: Fundamentals of Fracture Mechanics. – 488 p.
24. *Kravchenko O.V.* Hydrogen activation in processes increase permeability oil and gas-bearing rocks / *O.V. Kravchenko* // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2013. – № 1/6 (61). – P. 21–25.
25. The Zone of Damage for High-Modulus Materials in Explosion-Loaded Granite / *A.M. Leksowskij, V.A. Borovikov, N.S. Bozorov et al.* // Technical Physics Letters. – 2002. – Vol. 28, № 8. – P. 705–710.
26. *Karev V.I.* Effect of the stress-strain state of rocks on the filtration process and well flow rate : abstract of diss. for the degree Doctors of Engineering : spec. 01.02.04 / *V.I. Karev* // IPMash RAS. – S.-Pb., 2010. – 34 p.
27. *Pysarenko G.S.* Strength of materials / *G.S. Pysarenko, O.L. Kvitka, E.S. Umans'kyj.* – К. : Logos. – 562 p.
28. *Hubych I.B.* New methods of hydrocarbon saturation evaluation of abandoned wells / *I.B. Hubych, Yu.Z. Krups'kyj, A.M. Derenevsk'kyj* // Zbirnyk naukovykh prats' UkrDHR. Scientific papers of Ukrainian State Geological Exploration Institute. – 2018. – № 3. – P. 118–125.
29. *Yurevich G.G.* Rock mechanics of deep underground explosions / *G.G. Yurevich, V.D. Trofimov.* – М. : Nedra, 1980. – 156 p.
30. *Nagornyj V.P.* Technologies for the intensification of hydrocarbon production / *V.P. Nagornyj, I.I. Denysjuk* ; in *V.P. Nagornyj ed.* // NAS of Ukraine, S.I. Subbotin Institute of Geophysics. – Kyiv, 2013. – P. 268.
31. *Voitenko Yu.I.* Synergetics of geological mediums and its impact on the effectiveness of the exploitation and exploration for mineral deposits / *Yu.I. Voitenko* // Mineral resources of Ukraine. – 2019. – № 3. – P. 15–21.
32. *Vojtenko Yu.I.* The effectiveness of strong methods of stimulation of oil and gas production and the prospects of their use for unconventional reservoirs / *Yu.I. Voitenko* // Oil & gas industry of Ukraine. – 2013. – № 5. – P. 42–45.
33. *Закусило Р.В.* Засоби ініціювання промислових зарядів вибухових речовин : монографія / *Р.В. Закусило, В.Г. Кравець, В.В. Коробійчук.* – Житомир : ЖДТУ, 2011. – 212 с.
34. *Кравець В.Г.* Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху : монографія / *В.Г. Кравець, В.В. Коробійчук, В.В. Бойко.* – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 408 с.
35. *Коробійчук В.В.* Дослідження шляхів мінімізації витрат при буровибуховому способі видобування блоків декоративного каменя / *В.В. Коробійчук, Р.В. Соболевський, О.А. Зубченко* // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – Житомир, 2006. – № 4 (39). – С. 301–308.
36. Дослідження впливу буровибухових робіт на якість блочної продукції кар'єру на основі визначення геометричних характеристик її тріщинуватості / *В.В. Коробійчук, Ю.О. Подчашинський, О.О. Ремезова та ін.* // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – Житомир, 2007. – № 3 (42). – С. 143–150.
37. Визначення оптимального напрямку ведення гірничих робіт при видобуванні блоків з природного каменя / *А.О. Криворучко, В.В. Коробійчук, Р.В. Соболевський та ін.* // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – Житомир, 2016. – № 3 (78). – С. 150–163.
38. Cluster analysis of fracturing in the deposits of decorative stone for the optimization of the process of quality control of block raw material / *Ruslan Sobolevskiy, Natalia Zulevska, Valentyn Korobiichuk and other* // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 5/3 (83). – P. 21–29.

39. Definition of hue of different types of pokostivskiy granodiorite using digital image processing / V.Korobiichuk, V.Shamraj, O.Iziumova et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/5 (82). – P. 52–57.
40. The study of corrosion resistance of Pokostivskiy granodiorites after processing by various chemical and mechanical methods / I.Korobiichuk, V.Korobiichuk, M.Nowicki et al. // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 114, July. – P. 241–247.
41. A procedure for modeling the deposits of kaolin raw materials based on the comprehensive analysis of quality indicators / R.Sobolevskiy, O.Vaschuk, O.Tolkach et al. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – № 3 (87). – P. 54–67.
42. Korobiichuk V. Study of Ultrasonic Characteristics of Ukraine Red Granites at Low Temperatures / V.Korobiichuk // International Conference on Systems, Control and Information Technologies 2016. – Springer International Publishing, 2016. – P. 653–658.
43. Коробійчук В.В. Руйнування гірських порід та безпека вибухових робіт : підручник / В.В. Коробійчук, В.О. Соколовський, С.С. Іськов. – Житомир : ЖДТУ, 2019. – 332 с.
44. Коробійчук В.В. Метод оцінки тиску, що виникає при тепловому розширенні кристалів солей і льоду в порях природного каменю / В.В. Коробійчук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2011. – № 3 (58). – С. 176–179.
45. Shamraj V.I. Management of waste of stone processing in the framework of Euro integration of Ukraine / V.I. Shamraj, V.V. Korobijchuk, R.V. Sobolevs'kyj // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – Житомир, 2017. – № 2 (80). – С. 234–239.
46. Коробійчук В.В. Оцінка результатів дослідження залежності параметрів пружних хвиль від тиску в зразках природного декоративного каменю / В.В. Коробійчук // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія : Гірництво : зб. наук. праць. – Київ : НТУУ «КПІ» ; ЗАТ «Техновібух», 2012. – Вип. 22. – С. 101–105.
47. Evaluation of the effectiveness of natural stone surface treatment from Ukraine by mechanical and chemical methods / V.Shamraj, V.Korobiichuk, V.Levytskyi et al. // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. – 2018. – Vol. 33. – № 4. – С. 15–22.
48. Коробійчук В.В. Дослідження тріщинуватості Лезниківського родовища гранітів з перспективою видобутку блочної продукції / В.В. Коробійчук // Восточно-європейський журнал передових технологій. – Харків : Технологічний центр, 2013. – Вип. 6/5 (66). – С. 23–27.

References:

1. Fuller, R.B. (1982), *Synergetics*, MacMillan, N. Y., 350 p.
2. Haken, G. (1980), *Synergetics*, Mir, M., 400 p.
3. Mikhaluk, A.V. and Voitenko, Yu.I. (1991), *Pulsed rupture of rocks*, Nayk. dumka, Kiev, 204 p.
4. Griniiov, V., Zakharova, L., Diedich, I. and Nazymko, V. (2017), «Distant interaction of rock mass clusters around underground opening», *Mining of Mineral Deposits*, Vol. 11, No. 2, pp. 79–83.
5. Starostina, V.I., Sherbakov, S.S. and Sakys, D.R., *Synergetics in Geology*, [Online], available at: <https://www.sciencedirect.com/science/journal/18725791>
6. Khluyupin, A.N. and Dinariev, O.Yu. (2015), «Fractal Analysis of the 3D Microstructure of Porous Materials», *Technical Physics*, Vol. 60, No. 6, pp. 805–819.
7. Balankin, A.S. (1990), «Self-organization and dissipative structures in the deformed body», *Technical Physics Letters*, Vol. 16, No. 7, pp. 14–20.
8. Voitenko, Yu., Kravets, V., Shukurov, A. and Drachuk, O. «Peculiarities of brittle and ductile materials destruction and deformation during the explosion of industrial shaped charges», *Mining of Mineral Deposits*, Vol. 11, No. 2, pp. 12–20.
9. Mykuljak, S.V. (2018), «Hierarchical block model for earthquakes», *PHYSICAL REVIEW E* 97, 062130, pp. 1–7.
10. Rodionov, V.N., Sizov, I.A. and Tsvetkov, V.M. (1986), *Fundamentals of geomechanics*, Nedra, M., 306 p.
11. Griffiths, L., Heap, M.J., Baud, P. and Schmittbuhl, J. (2017), «Quantification of microcrack characteristics and implications for stiffness and strength of granite», *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, No. 100, pp. 138–150.
12. Vojtenko, Yu.I. and Kovtun, O.V. (2016), «On fracturing of brittle and ductile rocks by impact and explosion», *Herald of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Series Mining*, Vol. 30, pp. 36–48.
13. Kochetkov, S.I. and Voitenko, Yu.I. (2017), «About the causes of spontaneous combustion of coals», *Mineralni resursy Ukrainy*, No. 4, pp. 11–14.
14. Kochanov, A.N. and Odintsev, V.N. (2016), «Wave prefracturing of solid rocks under blasting», *Journal of Mining Science*, Vol. 52, No. 6, pp. 1080–1089.
15. Mikhalyuk, A.V. (2001), *Dilatancy and its influence on the properties of rocks under pre-limiting dynamic loads*, Vipol, Kiev, 102 p.
16. Savruk, M.P. (1988), «Vol. 2: Stress intensity factors in cracked bodies», *Fracture Mechanics and strength of materials*, in Handbook of 4 vol., UkrSSR Physico-mech. in-t, Nauk. dumka, Kiev, 619 p.
17. Vojtenko, Yu.I. (2000), «Physical and technical bases of borehole geotechnologies with controlled fracturing», D.Sc. Thesis of dissertation, spec. 05.15.11, Kiev, 377 p.
18. Guz, A.N. (1991), «Vol. 2: Brittle fracture of materials with initial stresses», *Nonclassical problems of fracture mechanics*, in 4 vol., Ukrainian Academy of Sciences, Institute of Mechanics, Kiev, 288 p.

19. Feldman, E., Kalugina, N. and Chesnokova, O. (2017), «Evolution of cracks in selvedge of the coal bed during its stationary working», *Mining of Mineral Deposits*, Vol. 11, No. 2, pp. 41–45.
20. Ivanova, N.I. (1981), «The study of the microcracks of mechanically stressed quartz diorite in the presence of aqueous phases», *Physico-chemical mechanics and lyophilic disperse systems*, Nauk. dumka, K., Vol. 13, pp. 111–114.
21. Ivanova, N.I., Kogan, B.S. and Pertsov, N.V. (1981), «The effect of the liquid phase in the formation of cracks in structures mechanically strained quartz diorite», *Doklady Akad. Geology*, Vol. 259, No. 6, pp. 1423–1428.
22. Prokopenko, V.A., Kovzun, I.G., Ulberg, Z.R. et al. (2018), «Physicochemical geomechanic and nanochemical processes in natural and technogenic minerals», *Visn. National Academy of Sciences of Ukraine*, No. 2, pp. 83–96.
23. Panasyuk, V.V., Andreikiv, A.E. and Parton, V.Z. (1988), «Vol. 1: Fundamentals of Fracture Mechanics», *Fracture Mechanics and strength of materials*, Handbook of 4 vol., UkrSSR Physico-mech. in-t, Nauk. dumka, Kiev, 488 p.
24. Kravchenko, O.V. (2013), «Hydrogen activation in processes increase permeability oil and gas-bearing rocks», *East-European journal of enterprise technologies*, No. 1/6 (61), pp. 21–25.
25. Leksowski, A.M., Borovikov, V.A., Bozorov, N.S. et al. (2002), «The Zone of Damage for High-Modulus Materials in Explosion-Loaded Granite», *Technical Physics Letters*, Vol. 28, No. 8, pp. 705–710.
26. Karev, V.I. (2010), «Effect of the stress-strain state of rocks on the filtration process and well flow rate», abstract for degree of D.Sc. dissertation, spec. 01.02.04, IPMash RAS, S.-Pb., 34 p.
27. Pysarenko, G.S., Kvitka, O.L. and Umans'kyj, E.S., *Strength of materials*, Logos, K., 562 p.
28. Hubych, I.B., Krups'kyj, Yu.Z. and Derenev'skyj, A.M. (2018), «New methods of hydrocarbon saturation evaluation of abandoned wells», *Zbirnyk naukovykh prats' UkrDHR. Scientific papers of Ukrainian State Geological Exploration Institute*, No. 3, pp. 118–125.
29. Yurevich, G.G. and Trofimov, V.D. (1980), *Rock mechanics of deep underground explosions*, Nedra, M., 156 p.
30. Nagornyj, V.P. and Denysjuk, I.I. (2013), «Technologies for the intensification of hydrocarbon production», in Nagornyj, V.P. (ed.), NAS of Ukraine, S.I. Subbotin Institute of Geophysics, Kyiv, pp. 268.
31. Voitenko, Yu.I. (2019), «Synergetics of geological mediums and its impact on the effectiveness of the exploitation and exploration for mineral deposits», *Mineral resources of Ukraine*, No. 3, pp. 15–21.
32. Vojtenko, Yu.I. (2013), «The effectiveness of strong methods of stimulation of oil and gas production and the prospects of their use for unconventional reservoirs», *Oil & gas industry of Ukraine*, No. 5, P. 42–45.
33. Zakusylo, R.V., Kravec', V.G. and Korobijchuk, V.V. (2011), *Zasoby inicijuvannja promyslovyh zarjadiv vybuhovyh rehovyn*, monografija, ZhDTU, Zhytomyr, 212 p.
34. Kravec', V.G., Korobijchuk, V.V. and Bojko, V.V. (2015), *Fizychni procesy prykladnoi' geodynamiky vybuhu*, monografija, ZhDTU, Zhytomyr, 408 p.
35. Korobijchuk, V.V., Sobolev'skyj, R.V. and Zubchenko, O.A. (2006), «Doslidzhennja shljahiv minimizacii' vytrat pry burovybuhovomu sposobi vydobuvannja blokiv dekoratyvnogo kamenja», *Visnyk Zhytomyr'skogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, Serija *Tehnichni nauky*, No. 4 (39), Zhytomyr, pp. 301–308.
36. Korobijchuk, V.V., Podchashyn'skyj, Ju.O., Remezova, O.O. et al. (2007), «Doslidzhennja vplyvu burovybuhovyh robit na jakist' blochnoi' produkcii' kar'jeru na osnovi vyznachennja geometrychnykh charakterystyk i'i trishhynuvatosti», *Visnyk Zhytomyr'skogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, Serija *Tehnichni nauky*, No. 3 (42), Zhytomyr, pp. 143–150.
37. Kryvoruchko, A.O., Korobijchuk, V.V., Sobolev'skyj, R.V. et al. (2016), «Vyznachennja optimal'nogo naprjamku vedennja girnychyh robit pry vydobuvanni blokiv z pryrodnogo kamenju», *Visnyk Zhytomyr'skogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, Serija *Tehnichni nauky*, Zhytomyr, No. 3 (78), pp. 150–163.
38. Sobolev'skyi, R., Zuiavska, N., Korobiichuk, V. et al. (2016), «Cluster analysis of fracturing in the deposits of decorative stone for the optimization of the process of quality control of block raw material», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5/3 (83), pp. 21–29.
39. Korobiichuk, V., Shamrai, V., Iziumova, O. et al. (2016), «Definition of hue of different types of pokostivskiy granodiorite using digital image processing», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4/5 (82), pp. 52–57.
40. Korobiichuk, I., Korobiichuk, V., Nowicki, M. et al. (2016), «The study of corrosion resistance of Pokostivskiy granodiorites after processing by various chemical and mechanical methods», *Construction and Building Materials*, Vol. 114, pp. 241–247.
41. Sobolev'skyi, R., Vaschuk, O., Tolkach, O. et al. (2017), «A procedure for modeling the deposits of kaolin raw materials based on the comprehensive analysis of quality indicators», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3 (87), pp. 54–67.
42. Korobiichuk, V. (2016), «Study of Ultrasonic Characteristics of Ukraine Red Granites at Low Temperatures», *International Conference on Systems, Control and Information Technologies 2016*, Springer International Publishing, pp. 653–658.
43. Korobijchuk, V.V., Sokolov'skyj, V.O. and Is'kov, S.S. (2019), *Rujnuvannja girs'kyh porid ta bezpeka vybuhovyh robit*, pidruchnyk, ZhDTU, Zhytomyr, 332 p.
44. Korobijchuk, V.V. (2011), «Metod ocinky tysku, shho vynykaje pry teplovomu rozshyrenni krystaliv solej i l'odu v porah pryrodnogo kamenju», *Visnyk Zhytomyr'skogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, Serija *Tehnichni nauky*, No. 3 (58), pp. 176–179.
45. Shamraj, V.I., Korobijchuk, V.V. and Sobolev'skyj, R.V. (2017), «Management of waste of stone processing in the framework of Euro integration of Ukraine», *Visnyk Zhytomyr'skogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, Serija *Tehnichni nauky*, Zhytomyr, No. 2 (80), pp. 234–239.
46. Korobijchuk, V.V. (2012), «Ocinka rezul'tativ doslidzhennja zalezhnosti parametriv pruzhnyh hvyl' vid tysku v zrazkah pryrodnogo dekoratyvnogo kamenju», *Visnyk Nacional'nogo tehnichnogo universytetu Ukrainy «KPI»*, Serija *Girnyctvo*, zb. nauk. prac', ZAT «Tehnovybuh», NTUU «KPI», Kyi'v, Issue 22, pp. 101–105.

47. Shamrai, V., Korobiichuk, V., Levytskyi V. et al. (2018), «Evaluation of the effectiveness of natural stone surface treatment from Ukraine by mechanical and chemical methods», *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, Vol. 33, No. 4, pp. 15–22.
48. Korobijchuk, V.V. (2013), «Doslidzhennja trishhynuvatosti Leznykivs'kogo rodovyshha granitiv z perspektyvoju vydobutku blochnoi' produkciï», *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, Tekhnologicheskii tsentr, Khar'kov, Issue 6/5 (66), pp. 23–27.

Войтенко Юрій Іванович – доктор технічних наук Українського державного геологорозвідувального інституту.

Наукові інтереси:

- фізика твердого тіла;
- гірництво.

<https://orcid.org/0000-0003-3077-2207>.

E-mail: voytenkoui@gmail.com.

Кравець Віктор Георгійович – доктор технічних наук, професор кафедри геoinженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- вибухові роботи;
- гірництво.

<https://orcid.org/0000-0003-3077-2207>.

E-mail: gan@geobud.kiev.ua.

Коробійчук Валентин Вацлавович – доктор технічних наук, професор кафедри розробки родовищ корисних копалин ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- видобуток та обробка природного каменю;
- гірництво.

<https://orcid.org/0000-0002-1576-4025>.

E-mail: korobiichykv@gmail.com.

Робота виконана в рамках науково-дослідницької теми Міністерства енергетики та захисту навколишнього середовища України «Розробка й апробація методики оцінки сучасної геодинамічної активності по перспективних площах та регіональних профілях ДДЗ і Передкарпатського прогину» і частинно підтримувалась підприємствами по добыче угля.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2020.