

УДК 622.552.51;539.422.3;539.8

 <https://doi.org/10.31996/mru.2019.3.15-21>

**Ю. І. ВОЙТЕНКО**, д-р техн. наук, головний науковий співробітник (Український державний геологорозвідувальний інститут), voytenkou@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3077-2207>

**Yu. VOITENKO**, Doctor of Technical Sciences, Ukrainian State Geological Research Institute, voytenkou@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3077-2207>

# СИНЕРГЕТИКА ГЕОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗРОБЛЕННЯ Й ПОШУКУ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

## СИНЕРГЕТИКА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТКИ И ПОИСКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

### SYNERGETICS OF GEOLOGICAL MEDIUMS AND ITS IMPACT ON THE EFFECTIVENESS OF THE EXPLOITATION AND EXPLORATION FOR MINERAL DEPOSITS

(Матеріал друкується мовою оригіналу)

Досліджено механізми спільного впливу гірських і пластових тисків, насичувальної рідини, елементів структури гірських порід і зовнішнього динамічного чи квазістатичного впливу на їхню поведінку в природних умовах, зокрема поблизу свердловини. На конкретних прикладах показано, що поведінка гірських порід з таким набором впливових чинників визначається законами синергетики і спільною дією зовнішнього впливу, нерівномірного напружено-деформованого стану породи, порового тиску й хіміко-механічних ефектів. Як приклади розглянуто результати газодобітних і газометричних досліджень ліквідованих свердловин, а також результати вибухової перфорації та інтенсифікації роботи нафтогазових свердловин на різних глибинах. Виникнення дефектів у мінералах з високим модулем пружності на мезо- та мікрорівнях ініціюється зовнішнім динамічним ефектом і незалежно під дією насичувальної рідини. Тоді під дією об'ємного нерівномірного стискання та пластового тиску, хіміко-механічних ефектів відбувається поступове руйнування теригенних порід на мікро- та макрорівнях. Результатом цих процесів є утворення ділянок поліпшеної проникності поблизу свердловин під час їхнього буріння, експлуатації та консервації. Під час буріння за традиційною технологією вони погіршуватимуть колекторські властивості пласта через проникнення фільтрату та твердої фази. Під час добування нафти й газу, зупинки та консервації свердловин – поліпшуватимуть ці властивості. Аналіз поведінки порід з позицій синергетики засвідчує, що найкращий режим навантаження на пласт під час буріння, закінчення та експлуатації свердловин – депресія (знижений тиск) на пласт. Визначено відомі та нові перспективні технології інтенсифікації видобутку нафти й газу.

**Ключові слова:** синергетика, дисперсія міцності, дисипативна структура, дилатансія, диспергування, хіміко-механічний ефект.

The mechanisms of joint influence of mountain and reservoir pressures, saturating fluid, structure elements of rocks and external dynamic effects on their behavior in natural conditions, in particular near of the well, are investigated. With specific examples, it is shown that the behavior of rocks with such a set of influencing factors is determined by the laws of synergetics and the combined action of external influences, uneven stress-strain state of the rocks, the pore pressure and chemo mechanical effects. Examples are the results of gas-flow and gas-metric studies of closed wells, as well as the results of explosive perforation and intensification of producing wellbores at different depths.

Defects occurrence in minerals with a high modulus of elasticity is initiated by an external dynamic effect and independently under the action of the saturating fluid. Then, under volumetric non-uniform compression and reservoir pressure, gradual fracturing of terrigenous rocks occurs at the micro and macro level. The result of these processes is the formation of areas of the improved permeability near the wells during drilling, production and suspending. When drilling on traditional technology they will impair formation reservoir properties via infiltration of water and solid phase. In oil and gas wells and in closed wells - improve these properties. Analysis of the behavior of rocks from the synergetic position shows that the best mode of loading on the reservoir during wells drilling, wells completion and oil and gas production is depression (reduced pressure) on the reservoir. The known and new promising technologies for the intensification of oil and gas production are determined.

**Keywords:** synergetic, strength dispersion, dissipative structure, dilatancy, dispersion, chemo mechanical effect.

#### Введение

Термин синергетика происходит от греческого “синергос”, что означает “вместе действующий”. Отцами-основателями этого научного направления считаются Г. Хакен и Р. Б. Фуллер, которые исследовали закономерности неравновесных процессов и самоорганизации сложных систем далеких от равновесия [20, 22]. Эти закономерности являются общими для живой и неживой природы. Общность заключается в том, что биологическим, химическим, физическим и другим неравновесным процессам свойственны неравновесные фазовые переходы, отвечающие особым точкам – точкам бифуркации, по достижению которых спонтанно изменяются свойства среды, обусловленные самоорганизацией при этом диссипативных структур. Контролирующим параметром самоорганизации диссипативных структур яв-

ляется стремление открытых систем к снижению производства энтропии. Ярким примером диссипативных структур, означающим переход открытой термодинамической системы из одного устойчивого состояния в другое, является переход ламинарного течения жидкости в турбулентное. Это происходит при достижении скорости течения  $u$  в точке бифуркации критического значения. Оно определяется критическим значением числа Рейнольдса  $Re_{cr} = ud/\nu$  ( $d$ ,  $\nu$  – размер канала и вязкость жидкости). Как будет показано ниже, аналогичные эффекты проявляются в горных породах при динамических воздействиях: взрыв или удар, а также в предварительно напряженных горных породах при совместном действии насыщающей жидкости, горного и пластового давлений и внешнего динамического воздействия с определенными параметрами. Процессы деформирования и разрушения горных пород и неметаллических конструктивных материалов также протекают в соответствии с законами и прин-

ципами синергетики. В частности, скачкообразное движение трещин в конструкционных материалах при взрыве и ударе [14] горных пород вокруг выработок в процессах разрушительного деформирования под действием горного давления [23] можно объяснить только с позиций основного принципа синергетики – принципа снижения энтропии в открытых системах при нестационарных процессах. Следует заметить, что рассматриваемые в статье вопросы являются далеко не единственными для решения с позиций синергетики. С помощью синергетики и фрактального анализа успешно анализируются процессы формирования осадочных комплексов, возникновения в них флюидонасыщенных зон дилатансии и дальнейшего их преобразования под действием высоконапорных перегретых жидкостей [24].

**Цель работы** – оценка возможности применения достижений современной физики твердого тела и физико-химической геомеханики для анализа поведения геологических материалов в условиях совместного действия горного и пластового давлений, насыщающей жидкости и внешних воздействий.

**Основной материал.** Элементы структуры, масштабный эффект, вид напряженно-деформированного состояния и их влияние на прочность горных пород вокруг выработки.

Известно, что горные породы (ГП) характеризуются физико-механическими свойствами, далекими от идеальной упругости [19]. Причем широкое разнообразие этих свойств объясняется не только минеральным составом и неравномерностью распределения компонент минерального скелета, но и тем, что ГП фактически являются средами со структурой. Структурными элементами, которые определяют как упругие, пластические, реологические, прочностные и другие физико-механические свойства ГП в массиве и геологических формациях, являются поры и трещины в широком смысле этих понятий: нано-, мезо-, микропоры и трещины; каверны, карстовые полости и макротрещины. Этот ряд можно дополнить дефектами (вакансиями, дислокациями) кристаллической решетки (снизу) и мегаобъектами – тектоническими разрывами и разломами (сверху). Последние учитываются в задачах глобальной геодинамики, а также для прогноза и поиска месторождений полезных ископаемых. Как правило, распределение элементов структуры в геологической среде подчинено стохастическим закономерностям. Поэтому в инженерной практике и прикладных исследованиях это распределение не учитывают, а исследуют деформационные и прочностные свойства ГП с позиций механики сплошной среды. При этом для описания поведения при нагрузке ГП используют упругие, упругопластические или вязкоупругопластические континуальные модели. В то же время многочисленные экспериментальные результаты исследований деформирования и разрушения ГП, дисперсия их физико-механических характеристик, в частности прочности, зависящей от соотношения “размер объекта – размер и количество дефектов”, свидетельствуют о том, что поведение ГП подчиняется законам синергетики деформируемого твердого тела, классической и фрактальной механики разрушения [1, 3, 10, 15]. Покажем это на простых идеализированных примерах. Рассмотрим плоскую задачу о цилиндрическом отверстии диаметром  $2R$  с трещиной на его стенке глубиной  $l$ . В случае макрообъекта с характерным размером  $R=10^{-1}$  м это будет модель скважины с начальной трещиной на стене, например для гидроразрыва пласта (ГРП). Если радиус будет составлять  $\approx (1 \dots 10)$  м, то это будет подземная выработка. В случае микрообъекта с характерным радиусом  $R = 10^{-3} \dots 10^{-4}$  м – это идеализированная модель микропоры с макротрещиной на ее стенке. Рассмотрим две задачи о прочности твердого тела, в данном случае ГП:

– при действии внутреннего давления  $p$  на стенки отверстия и трещины;

– при воздействии на большом расстоянии от отверстия сдвиговых напряжений  $\tau$  в условиях чистого сдвига. Первая задача и ее решение позволяют определить условия предельного равновесия ГП вокруг скважины в случае внутреннего давления  $p$  жидкости или газа, в частности при ГРП. Вторая из этих задач реализуется в случае, когда длинная горизонтальная выработка (скважина) находится в поле сжимающих напряжений в одной плоскости и растягивающих – в другой. В реальных геологических условиях этот случай приближается к сформулированной задаче, если одна из компонент горного давления, например вертикальная, значительно превышает другую горизонтальную или наоборот. Решения этих задач известны [12]. Согласно этим решениям прочность ГП с цилиндрическим отверстием и трещиной на его стенке непрерывно уменьшается с увеличением величины  $l/R$  и описывается функцией  $K_I/p \sqrt{\pi l} = F_{II}(l)$ . При этом  $dF_{II}/dl < 0$ . В случае второй задачи прочность описывается функцией  $K_{II} = \tau \sqrt{\pi l} F_{II}$ . При этом до величины  $l/R < 1$  функция  $F_{II}$  возрастает ( $dF_{II}/dl > 0$ ), а при  $l/R < 1$   $dF_{II}/dl < 0$ . При  $l/R = 1$   $dF_{II}/dl = 0$ .  $K_I$ ,  $K_{II}$  – коэффициенты интенсивности напряжений в вершинах трещин отрыва и поперечного сдвига. Условие предельного равновесия для небольших глубин  $K_I = K_{IG}$ ,  $K_{II} = K_{IIC}$  ( $K_{IG}$ ,  $K_{IIC}$  – трещиностойкость или вязкость разрушения ГП). Эти примеры показывают, что дисперсия прочности зависит не только от размеров трещин и трещиноподобных дефектов, но и от вида напряженно-деформированного состояния (НДС) ГП. Заметим, что наличие начальных напряжений, в данном случае горного давления, еще более усложняет зависимость прочности ГП и ее дисперсию от величины трещин в ГП и соотношений между компонентами напряжений [4, 16]. Если зафиксировать размер трещины величиной  $10^{-1}$  м, то очевидно, что прочность ГП в случае чистого сдвига будет разной для  $R=10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}; 10^0$  м. При этом наибольшей она будет при  $R=10^0$ . Минимальной – при  $R = 10^{-1}$  м. При других  $R$  она имеет промежуточные значения. Эти примеры дополняют и расширяют известные данные о зависимостях прочности ГП: увеличение с уменьшением размера образца; уменьшение с увеличением количества трещин в образце или геологической среде; дисперсия прочности с изменением мощности пласта, снижение прочности с увеличением порового давления и т. п. [1, 2]. В данной работе не рассматривается влияние температуры, поскольку заметное влияние этого параметра на прочность и твердость ГП начинается с температур  $\approx 300\text{--}500$  °С. Этот параметр, как один из существенных факторов синергетического анализа поведения породы, имеет значение при использовании термобарохимических методов интенсификации добычи. И, вероятно, именно кооперативные, синергетические эффекты с учетом теплового и химического факторов определяют состояние системы “порода-коллектор – флюид” после воздействия и эффективность методов.

#### **Воздействие насыщающей жидкости на прочность горной породы и диспергирование ее при нагрузке**

Общеизвестным фактом является различие деформационных и прочностных сухих и насыщенных горных пород [15]. Особый интерес представляют эти изменения и их механизмы при насыщении пород водой или водными растворами солей, или порообразующих минералов. Это связано с тем, что и бурение, и процессы повышения производительности скважин, как правило, сопровождаются насыщением геологической среды водой или водными растворами солей и поверхностно-активных веществ (ПАВ). Это касается как систем разработки

месторождений методами скважинной геотехнологии, так и подземной разработки месторождений полезных ископаемых. Вода является наиболее распространенным компонентом горных пород, которые, как правило, находятся в полидисперсных нано- и микрочернистом состояниях и испытывают совместное воздействие механических напряжений жидких и газообразных сред. При этом не имеет значения высокая растворимость породообразующих минералов, а также объемы жидкой среды [7, 18]. В работе [15] показано, что увлажнение осадочных горных пород способствует увеличению их пластичности и снижению прочности. Увеличение пластичности горных пород при увлажнении связывается с тремя основными факторами:

- частичным растворением кристаллизационных связей в структуре породы;
- эффектом П. А. Ребиндера;
- формированием адсорбционных пленок, которые играют роль межзерновой смазки.

В то же время в серии работ Н. И. Ивановой и соавторов показано, что вода и ее растворы способствуют диспергированию почти непроницаемых пород, относящихся к упруго-хрупким. Обязательным условием является наличие развитой поверхности контактов между нано- и микрочернистой полиминеральной структурой и связанной с ней большой контактной поверхностью пород, образованной внутренними микро- и наноразмерными пределами раздела фаз различного минералогического состава [18]. При этом эффективная концентрация воды, то есть ее термодинамическая активность, существенно зависит как от количества, так и от химической природы растворенных в ней компонентов. Так, с использованием представлений нанонауки 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 горных пород, в частности алюмо- и железооксидосиликатных, вследствие действия механических внешних напряжений [6, 7]. В основе механохимического и нанохимического самодиспергирования горных пород с участием воды лежит несколько основных механизмов, среди которых прежде всего механизм гидrolитического разрушения кремний-кислородных связей силикатных материалов [18, 21]:



Гидролиз облегчает движение дислокаций в результате разрыва слабых водородных связей и приводит к формированию линий сдвига и образованию нанотрещин. Под влиянием механических сил нанохимическая реакция (1) резко ускоряется, что, в свою очередь, облегчает процесс развития нанотрещин разрушения в силикатной породе в присутствии даже следов воды. Заметим, что интенсификацию различных физико-химических процессов под действием механических напряжений наблюдали, например, авторы работ [15] (интенсификация массообменных процессов), [13] (интенсификация коррозионных процессов). В работе [7] и ряде других работ авторов на модельном примере нагруженного сжатием гранодиорита было показано, что в течение месяца произошло диспергирование образца практически на 10 %. При этом нанотрещины с начальными размерами 10–100 нм разрослись до трещин, размеры которых варьировали от микрометра до долей миллиметра с максимумом 200 мкм. Причиной, заставляющей жидкость самопроизвольно проникать сквозь практически непроницаемые плотные полиминеральные горные породы в процессах их метаморфизма или выветривания, является энергетический выигрыш в случае замены границы зерна нанопленкой жидкости. В работах [9, 18] показано,

что для запуска практически любого процесса механического разрушения горных пород необходимо химическое взаимодействие воды с силикатными породами на наночерни, в частности реакция (1). После гидrolитического разрушения кремний-кислородных связей и образования нанотрещин межзерненные границы между кристаллами А и В замещаются жидкостью С согласно условию Гиббса-Смита [18]:

$$\sigma_{\text{МЗ}} > \sigma_{\text{АС}} + \sigma_{\text{ВС}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{МЗ}}$  – энергия на границе зерна;  $\sigma_{\text{АС}}$ ,  $\sigma_{\text{ВС}}$  – поверхностные энергии на границе кристаллов с жидкой фазой. При этом энергия границы зерна оказывается больше суммы поверхностных энергий на грани кристаллов с жидкой фазой. В результате на сопряженных плоскостях происходит процесс реконструкции поверхности с помощью химических реакций, а растущие при этом фасетки (границы), упираясь в соседние зерна, кристаллизационным давлением разрываю материал по границам зерен.

#### Влияние вида напряженного состояния и минерального состава на деформационные, прочностные и фильтрационные свойства горных пород

В серии работ Н. И. Ивановой и соавторов, в частности в работе [7], показано, что кроме физико-химических свойств жидкости, которая насыщает ГП, имеет значение вид напряженно-деформированного состояния, который действует в данном объекте. Причем этот фактор согласно результатам исследований, изложенных в работе [7], является основным. Он определяет направление и количество трещин внутри кристаллов. В экспериментах показано, что сначала диспергируется сеткой микротрещин плагиоклаз, а затем кварц, биотит, апатит, роговая обманка и др. В образцах с неполным разрушением вдоль магистрального сдвига образовалась сеть микротрещин разрыва размерами от долей до 2 мм. В работе [21] отмечается отличие механизмов остаточной деформации, склонных и не склонных к внезапным выбросам песчаников. В условиях неравномерного объемно-деформированного состояния исследовались песчаники с несколькими типами цемента. Максимальные гидростатические давления в экспериментах составляли 100 МПа, поровое давление в образцах достигало 75 МПа. В экспериментах было установлено, что некоторые песчаники, в частности с кварцевым цементом, пленочным кварцевым цементом, и в случае соприкосновения зерен кварца без цемента являются упругохрупкими породами с ограниченной способностью к пластической деформации. Это к стати подтверждают данные работы [15], где показано, что породы этого класса характеризуются наибольшей склонностью к дилатансионному разуплотнению и разупрочнению. Песчаники с глинисто-сидеритным и кальцитовым цементами более пластичны. При этом первые имеют низкую прочность и наиболее высокую пористость. А вторые имеют высокое сопротивление разрушению.

Фильтрационные свойства горных пород, как правило, связаны с деформационными корреляционными зависимостями. При этом по характеру этих зависимостей различают несколько типов пород [8]: породы первой категории представляют собой плотные крепко сцементированные мелкозернистые песчаники, доломиты и т. п. Эти породы деформируются под действием приложенных статических напряжений чисто упруго; их проницаемость по мере роста напряжений уменьшается, но обратимо; вторую категорию составляют мелко- и среднезернистые песчаники с небольшим содержанием глины, алевролиты и известняки. Эти породы при небольших депрессиях также деформируются упруго, их проницаемость при этом, как правило, не меняется или немного уменьшается. При дости-



жении депрессией определенной величины, которая зависит от свойств породы, начинается неупругое деформирование. С увеличением неупругих деформаций проницаемость породы значительно уменьшается (на десятки процентов и даже в разы). Это падение проницаемости носит необратимый характер, то есть при снятии напряжений она остается пониженной. При увеличении сдвиговых напряжений (при увеличении депрессии) скорость деформирования образцов увеличивается, и когда деформация достигает некоторой критической величины, порода начинает разуплотняться в режиме дилатансии и разрушаться, что сопровождается резким увеличением ее проницаемости даже по сравнению с первоначальным значением. К третьей категории относятся песчаники с большим содержанием глины. Для них характерны пластические деформации при депрессии, и даже при значительных деформациях разрушения образцов не происходит. Снижение проницаемости для этих пород все время необратимо.

#### Влияние внешних динамических (взрыв, удар, горение) воздействий на прочность и фильтрационно-емкостные свойства горных пород

Рассмотрим некоторые результаты исследований поведения деформируемого твердого тела, испытывающего механическое воздействие, в том числе при взрыве и ударе. Согласно работе [1] это поведение определяется образованием и развитием диссипативных структур (ДС) на различных иерархических уровнях. Причем диссипация энергии в твердом теле происходит только при возникновении сдвиговых напряжений. Физической основой иерархического строения ДС, в том числе при взрыве и ударе, является сдвиговая устойчивость твердых тел, обуславливающая различие характерных пространственных масштабов областей локализации и диссипации энергии, подводимой к деформируемому твердому телу при квазистатических и динамических воздействиях.

Из физических соображений время релаксации энергии определяется суммой времен действия и деформационного последствия – процессом деформирования среды после прохождения импульса, а время релаксации импульса соразмерно со временем действия нагрузки. Поэтому время релаксации энергии намного превышает время релаксации импульса. В работе [1] показано, что кумуляция закачиваемой извне энергии в локализованных областях обусловлена различием времен релаксации энергии  $\tau_e$  и импульса  $\tau_p$ , причем

$$\tau_p = \frac{a}{c_t} \ll \tau_e = \frac{a}{c_a} = \tau_p \cdot c_t / c_a = \tau_p \Lambda_0, \quad (3)$$

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 уже при относительно малых нагрузках  $\sigma > \sigma_{кр} = 0,5\rho c_a \sim 1$  МПа, в частности для кварца ( $\text{SiO}_2$ )  $\sigma_{кр} \approx 3,3-9,9$  МПа, происходит образование локализованных сильнонеравновесных областей, в которых происходит рассеяние энергии. Практически уже при малых нагрузках начинается отклонение динамического режима деформирования большинства горных пород от упругого, что соответственно и подтверждают многочисленные экспериментальные данные, полученные независимо в работе [15] и других работах автора. Анализ экспериментальных результатов позволил автору монографии [15] сформулировать следующие выводы:

– аномалия, связанная с опережающим развитием поперечных деформаций и, как следствие, с началом разуплотнения, при статических нагрузках возникает при напряжениях  $\sigma_* \approx 1/3 \dots 2/3$  предельной величины (прочности на сжатие);

– при динамических нагружениях аномальное поведение пород начинается значительно раньше. Причем интенсивность нагрузки, соответствующая его началу, зависит от генетических особенностей пород; в чистых малопористых отсортированных песчаниках, кварцитах, прочных гранитах, известняках, доломитах, солях, каменном угле (антраците) заметное разуплотнение структуры может иметь место с момента вступления импульса давления, то есть при очень малых по сравнению с прочностью  $\sigma_0$  давлениях  $\sigma_* \approx (0,03 \dots 0,05)\sigma_0$ ; причем это отклонение от идеально упругого поведения тем интенсивнее, чем выше неравномерность генерируемого напряженного состояния. Наглядной иллюстрацией такого поведения пород являются их диаграммы деформирования, показанные на рисунке (а – для чистого плотного песчаника месторождения Ян-Чен (Китай), б – для глинистого песчаника нефтегазовых месторождений Предкарпатья. Штриховыми линиями показаны диаграммы одноосного статического сжатия) [15].

Величина  $\sigma_*$  сильно зависит от неравномерности напряженного состояния породы  $\zeta$ , генерируемого импульсом давления. При  $\zeta = \sigma_3 / \sigma_1 \rightarrow 0$  она может составлять несколько процентов от разрушающего напряжения  $\sigma_0$  даже в породах, склонных к уплотнению (рисунок).

Поскольку накопление энергии при взрыве и ударе, как и при других видах нагружения, определяется объемными и сдвиговыми деформациями, то можно оценить масштаб, в котором рассеивается избыточная энергия и отношение масштабов ДС соседних структурных уровней [1]:

$$\frac{L_{i+1}^{ДС}}{L_i^{ДС}} = \frac{L_i}{L_s} = \frac{C_1^2}{C_s^2} = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}, \quad (4)$$

где  $L_1, L_s$  – характерные масштабы, в которых рассеивается энергия объемного деформирования и сдвига;  $C_1, C_s$  – скорость продольного и поперечного звука;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Для среднего значения коэффициента Пуассона  $\nu = 0,3$  формула (4) дает значение  $\Lambda_1 = 3,5$ . Для некоторых ГП параметр  $\Lambda_1$  близок к указанному. Например, отношение размеров зоны радиальных трещин к размеру зоны дробления разных горных пород –  $\approx 3,9-4,1$ ; зоны предразрушения  $R_{пр}$  к радиусу зоны радиальных трещин  $R_{тр}$  в песчанике составляет 2–3 [19]. Следует заметить, что природа упомянутого эффекта волнового предразрушения хрупких пород при взрыве одиночного заряда совсем другая, чем эффекта дилатансионного разуплотнения в поле сдвиговых напряжений. Об этом говорит скорость релаксации и время существования зоны предразрушения. Это время составило в эксперименте 1–3 месяца. Время релаксации необратимых дилатансионных объемных деформаций, по

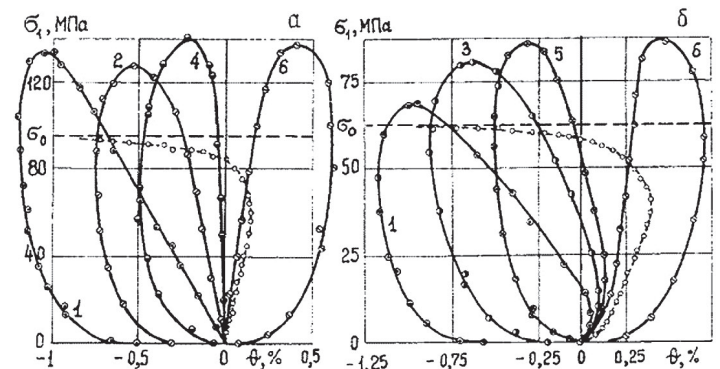


Рисунок. Диаграммы объемного деформирования песчаников при  $\zeta = 0(1); 0,132(2); 0,135(3); 0,174(4); 0,183(5)$  и  $1,0(6)$

мнению автора работы [15], на порядок больше. Об этом опосредованно свидетельствуют времена сохранения эффектов повышения проницаемости пород-коллекторов вокруг скважин в результате взрывных обработок ( $\geq 12$  месяцев) [15]. Однако следует заметить, что длительный эффект сохранения повышенной продуктивности скважины обеспечивается не только дилатансионным разуплотнением, но скорее всего синергетическим действием пластового и горного давлений совместно с результатами динамического воздействия на ГП.

Волновое предразрушение хрупких горных пород является ярким примером возникновения ДС при переходе через точку бифуркации. Точкой бифуркации является критическая скорость нагружения стенок скважины и скорость деформации ГП. До достижения этих критических параметров при горении и низкоскоростной детонации взрывчатого вещества (ВВ) происходит образование одной или нескольких радиальных трещин разрыва, а зона предразрушения отсутствует. При переходе через зону бифуркации появляется зона предразрушения в виде распределенных по ГП микротрещин, которая увеличивается при повышении скорости детонации ВВ. Как правило, она превышает размер зоны радиальных трещин [10]. Вероятно, такая же (синергетическая) природа возникновения зон разуплотнения в ГП при взаимодействии взрывных волн. Они появляются благодаря параметрам и характеру динамического воздействия на ГП, которые находятся выше точки бифуркации. При меньших параметрах воздействия по энергии взрыва или скорости выделения энергии, при неправильном замедлении между моментами взрыва соседних зарядов, при отказе одного из двух зарядов точка бифуркации не достигается и разуплотнение не происходит. Следует заметить, что изложенные выше результаты относятся к монолитным ("бездефектным") горным породам. Горные породы, как показано выше, являются материалами со структурой, в которых в условиях высоких давлений и температур формируется вторичная пористость и трещиноватость.

Научное направление исследований формирования таких ДС базируется на применении методов механики горных пород, механики подземного взрыва и механики разрушения. Основные результаты исследований сводятся к следующим. В работе [4] показано, что в предварительно напряженных ГП в случае действия горного давления на глубинах  $\geq 1000$  м подрастание существующих макротрещин возможно только в поле динамических напряжений сдвига. То есть опять же – в случае взаимодействия взрывных волн или волн от других источников энергии. На малых глубинах залегания возможно подрастание и трещин разрыва при выполнении двух условий: достаточная амплитуда кольцевых растягивающих напряжений и достаточное время действия этих напряжений, которое превышает инкубационный период старта трещины. Все это обеспечивается свойствами взрывчатого вещества, массой и конструкцией заряда. Характерно, что радиус зоны разуплотнения и трещинообразования увеличивается с ростом мощности и скорости детонации ВВ и уменьшением времени нарастания давления во взрывной полости. Продолжительность действия импульса, как на стадии нарастания давления, так и полного времени увеличивается при уменьшении скорости детонации ВВ. Возникновение микротрещин различной природы и подрастание размеров имеющихся макротрещин, их увеличение под действием горного и пластового давлений способствует увеличению фильтрационно-емкостных характеристик ГП. Отметим, что аналогичный эффект предразрушения и разуплотнения ГП наблюдаются также при высокоскоростном ударе, например,

кумулятивной струей (КС), так как проникновение КС аналогично взрыву линейного заряда переменного радиуса [25]. При этом в ближней зоне хрупкие породы малой прочности переходят в сыпучее состояние и выносятся пластовым флюидом в скважину. Породы большой прочности разрушаются трещинами, особенно при большой плотности перфорации.

#### **Совместное воздействие основных влияющих факторов на состояние и разрушение горных пород.**

##### **Практические приложения**

Таким образом, в ряде работ отмечается эффект интенсификации процессов диспергирования горных пород при высоких напряжениях в зависимости от вида напряженно-деформированного состояния (НДС) и типа насыщающей жидкости. Этот эффект часто инициируется внешним воздействием: взрывом, ударом, имплозией или процессом проходки выработки, например бурением. В монографии [13] сформулирован наиболее общий вывод касательно влияния интенсивности напряжений и деформаций на скорость взаимодействия жидкой среды с твердым телом: взаимодействие среды с материалом усиливается, если повышается энергетический уровень частиц среды или кристаллической решетки материала, например в результате деформирования. Причем наиболее интенсивное взаимодействие среды и материала наступает тогда, когда в материале возникают пластические деформации.

При внешнем динамическом и квазистатическом воздействии на хрупкие ГП (взрыв, удар, депрессионное воздействие из скважины) в окрестности выработки формируются ДС разного масштаба и различной природы. В частности, образуются мельчайшие трещины преимущественно в высокомолекулярных минералах на микро- и мезоуровнях (А. Н. Кочанов, В. Н. Одинцов, В. А. Боровиков), дилатансионной пористости и микротрещиноватости (А. В. Михалюк). При статической и, возможно, квазистатической депрессии в окрестности скважины образуются макротрещины под действием касательных напряжений, превышающих прочность ГП на сдвиг [8]. С течением времени под действием горного давления в условиях частичного или полного насыщения водой или водными растворами солей и ПАВ происходит постепенное диспергирование низкопористых, частично нарушенных микротрещинами ГП, в том числе вдоль берегов макротрещин. О реальности такого изменения фильтрационных свойств ГП свидетельствуют многочисленные примеры постепенного во времени увеличения продуктивности скважин, в том числе ликвидированных [5], которые авторы связывают преимущественно с прорывом пластовых флюидов через блокирующий их фильтрат бурового раствора. По нашему мнению, это явление – результат синергетического действия горного и пластового давлений, технологических внешних воздействий при бурении и перфорации и насыщающих жидкостей в зоне, примыкающей к скважине. Этим результатом является постепенное диспергирование и увеличение фильтрационных и емкостных свойств пород. Породы-коллекторы – песчаники и алевролиты пористостью 6–9 %. Данный эффект обеспечивается неравномерным трехосным напряженным сжатием или сжатием-растяжением (при внутрискважинном воздействии даже без разрыва) породы вокруг скважины. В случае открытого ствола скважины, независимо от давления в ней жидкости на расстояниях в несколько радиусов скважины окружные напряжения в несколько раз отличаются от радиальных [17]. Причем при глубокой депрессии на пласт или полной депрессии, когда давление в скважине нулевое, например, при подъеме бурового инструмента, оба напряжения сжимающие. При репрессии на пласт, например при

спуске бурового інструмента, особливо при тисненнях, близьких к гідророзриву, окружні напруження растягиваючі, а радіальні – сжимаючі. В обох випадках в певній області, близькій к скважині, виконується умова  $\zeta = \sigma_r / \sigma_t = 0 \dots 0,3$ . Це відповідає умові дилатансійного розуплотнення навіть при статичній навантаженні, яка створюється гоним тисненням і тисненням рідини в скважині і пласті. Спільне діяння пластового флюїда і дилатансії ГП призводить к формуванню зони підвищеної проникності навколо скважини. Звернемо увагу, що мова йде про крихкі і квазікрихкі дилатуючі породи. Описаний вище механізм формування проникності підтверджується результатами досліджень типів вторинних пор в терригенних колекторах на великих глибинах центральної частини Дніпровско-Донецької впадини [11]. Из трьох типів пор, описаних автором, два утворюються під діянням геомеханічних і фізико-хімічних процесів: пори вищелачивання вздовж тріщин і пори-каверни, пов'язані з руйнуванням обломків в зонах безцементного контакту зерен.

Пример. Работа по интенсификации притока газа с применением взрывной технологии проводилась в скважине № ХЗ одного из газовых месторождений ДДВ. Порода-коллектор – песчаник, в отдельных интервалах, возможно, трещиноватый. Пористость – 6–9 %. Обработка взрывами секционных торпед с предварительной перфорацией была проведена в двух из четырех намеченных интервалов: 5300–5305 м, 5285,2–5297 м. После обработки продуктивность скважины сначала уменьшилась с 13 до 5 тыс. м<sup>3</sup>/сутки. Для изменения режима работы скважина подвергалась депрессионным воздействиям путем сбрасывания газа на факел. Через полгода продуктивность увеличилась до 18 тыс. м<sup>3</sup>/сутки. В течение следующего года скважина работала с дебитом 25–30 тыс. м<sup>3</sup>/сутки. Такие изменения параметров работы скважины можно связать только с синергетическим поведением породы-коллектора под действием взрывных нагрузок и последующим разупрочнением и разуплотнением под действием горного и пластового давлений и насыщающих флюидов.

Кроме этого примера, известны десятки примеров, когда слабее по сравнению с гидроразрывом воздействия на пласт малогабаритных торпед, генераторов давления, перфораторов и других импульсных устройств обеспечивали промышленные фонтанирующие притоки нефти, газа и конденсата на глубинах от  $\approx 1200$  до 4900 м [4]. На глубинах  $\sim 3000$ –5000 м при взрыве малых зарядов ( $\sim 2 \dots 3$  кг) вообще не образуются радиальные макротрещины или их глубина не превышает размер канала перфорации. И, тем не менее, продуктивность многих газовых скважин увеличивалась в десятки и более раз, нефтяных – кратно. Это можно объяснить только синергетическим действием перечисленных выше факторов, включая внешнее динамическое воздействие. В пользу синергетики поведения пород-коллекторов вблизи скважин опосредовано говорит также постепенное во времени нарастание продуктивности обработанных скважин [4]. Это время в зависимости от пластовых параметров, вязкости пластового флюида и свойств породы-коллектора может составлять от нескольких дней до месяца и более.

В завершение следует обратить внимание на возможности учета синергетических эффектов в технологиях поиска полезных ископаемых. Так, аномально высокая концентрация и состав газов в исследованиях методом наземной геохимии может означать наличие зоны повышенной проницаемости в нижезалегающих породах, которая образовалась и развивалась под действием негидростатического горного давления и насыщающих флюидов. Это, кстати говоря, подтверждают данные газометрических и газодебитных съемок в окрестно-

сти ликвидированных скважин, которые в процессе заканчивания подвергались взрывным воздействиям при перфорации [5]. Концентрация газов, отобранных в контрольных скважинах, увеличивается по мере приближения к устью скважины. Несимметричность зон выделения газа может быть связана с анизотропией свойств пород или наличием в них трещин.

Формирование локальных скоплений метана в угольных пластах и вмещающих породах возможно благодаря неравномерному объемному напряженно-деформированному состоянию пород и динамическим возмущениям, которые могут быть вызваны сейсмическими событиями или взрывными работами.

### Выводы

1. При отсутствии внешнего воздействия на ГП в окрестности выработки состояние геологической среды определяется величиной горного и пластового давлений, а при наличии жидкости в выработке (скважине) – также величиной ее давления; дисперсия прочности ГП и условие предельного равновесия – соотношением “размер выработки – размер макротрещины или множества трещин в ее окрестности”.

2. В окрестности глубоких выработок, в частности скважин, когда величина вертикальной и горизонтальной компонент тензора напряжений близка к величине  $\sigma_c$  и обеспечивает соответствующую неравномерность нагружения, в плотных упругокрихких породах, не насыщенных и насыщенных водой или водными растворами, возникают области дилатансии как в условиях депрессии на пласт, так и при репрессии. Это явление сопровождает как процесс сооружения скважины, так и процессы ее эксплуатации и ремонта, влияя на фильтрационные потоки и продуктивность, особенно в случае открытого забоя.

3. При внешнем динамическом воздействии на крихкие и квазікрихкие ГП (взрыв, удар, проникание) в зависимости от параметров воздействия в окрестности выработки, кроме макротрещин, образуются диссипативные структуры в виде мельчайших трещин на микро- и мезоуровне, которые впоследствии под действием горного давления и соответствующих насыщающих жидкостей формируют зоны диспергирования ГП.

4. Результаты анализа синергетического воздействия на ГП горного давления, насыщающих жидкостей и внешнего динамического или квазістатического воздействия позволяют определить наиболее значимые существующие и перспективные технологии для скважинной добычи полезных ископаемых, в том числе нефти и газа:

- бурение при депрессии на пласт; первичное вскрытие открытым стволом в случае устойчивых пород;
- вторичное вскрытие пластов при глубокой депрессии, в том числе вскрытие части интервала перфорацией в жидкой и перфорация остальной части в газовой среде;
- дополнительная глубокая перфорация пласта после глубокой депрессии на пласт;
- различные виды депрессионного воздействия на пласт: ударно-депрессионное; депрессионное воздействие с предварительным разогревом (термоимплозия); длительная статическая депрессия после доведения перфорации до требуемой плотности;
- взрывная обработка пласта с последующим депрессионным освоением или воздействием в случае слабого эффекта;
- интенсификация притока нефти и газа с применением горения, взрыва и других импульсных устройств в условиях депрессии на пласт, в том числе в химически активной жидкой среде.

5. Успешность технологий интенсификации добычи нефти и газа, как и успешность поисковых работ на нефть и газ, зависят от полноты знаний о поведении геологических сред с позиций синергетики, особенно с увеличением глубины залегания пластов.



## ЛІТЕРАТУРА

1. Баланкин А. С. Самоорганизация и диссипативные структуры в деформируемом теле//Письма в ЖТФ. – 1990. – Т. 16. – Вып. 7. – С. 14–20.
2. Войтенко Ю. И., Ковтун А. В. О предвыбросовом состоянии пород и возможном механизме горных ударов и внезапных выбросов//Мінеральні ресурси України. – 2018. – № 2. – С. 32–35.
3. Войтенко Ю. И., Ковтун О. В. Про в'язке та крихке руйнування гірських порід при ударі та вибуху//Вісник НТУУ "КПІ": Серія гірництво. – 2017. – № 34. – С. 9–17
4. Войтенко Ю. И. Фізико-технічні основи свердловинних геотехнологій з керуванням тріщиноутворенням, дис. д-ра техн. наук, 05.15.11, Київ, Україна, 2000 р. – 377 с.
5. Губич І. Б., Крупський Ю. З., Дереневський А. М. Методика перегляду перспектив нафтогазоносності розрізу ліквідованих свердловин//Збірник наук. праць УкрДГРІ. – 2012. – № 3. – С. 120–127
6. Иванова Н. И. Изучение микротрещиноватости механически напряженного кварцевого диорита в присутствии водных фаз. В кн.: Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем. – К.: Наукова думка, 1981. – Вып. 13. – С. 111–114.
7. Иванова Н. И., Коган Б. С., Перцов Н. В. Влияние жидкой фазы на образование трещинных структур в механически напряженном кварцевом диорите//Доклады АН СССР. Геология. – 1981. – Т. 259. – № 6. – С. 1423–1428.
8. Карев В. И. Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на фильтрационный процесс и дебит скважин: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.04/ИПМаш РАН. – С. – Пб., 2010. – 34 с.
9. Ковзун И. Г., Проценко И. Т., Перцов Н. В. Роль химических и физико-химических процессов при получении и формировании свойств силикатных суспензий//Коллоид. журнал. – 2001. – Т. 63. – № 2. – С. 214–219.
10. Кочанов А. М., Одинов В. А. Волновое предразрушение монолитных горных пород при взрыве//Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 38–48.
11. Макогон В. В. Деякі особливості вторинних колекторів центральної частини Дніпрово-Донецької западини на великих глибинах//Мінеральні ресурси України. – 2017. – № 4. – С. 24–28.
12. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие в 4-х т./АН УССР Физико-мех. ин-т. – Киев: Наукова думка, 1988. – Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами/М. П. Саврук. – 1988. – 619 с.
13. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие в 4-х т./АН УССР Физико-мех. ин-т. – Киев: Наукова думка, 1988. – Т. 1: Основы механики разрушения/В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон. – 1988. – 488 с.
14. Михалюк А. В., Войтенко Ю. И. Импульсный разрыв пород. – Киев: Наукова думка, 1991. – 204 с.
15. Михалюк А. В. Дилатансия и ее влияние на свойства горных пород при определенных динамических нагрузках. – Киев: Випол, 2001. – 102 с.
16. Неклассические проблемы механики разрушения: в 4 т./АН Украины Ин-т механики. – Киев, 1991. – Т. 2: Хрупкое разрушение материалов с начальными напряжениями/А. Н. Гузь. – 288 с.
17. Писаренко Г. С., Квитка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів. – К.: Логос, 2005. – 562 с.
18. Прокопенко В. А., Ковзун І. Г., Ульберг З. Р., Циганович О. А., Панько А. В. Фізико-хімічна геомеханіка і нанохімічні процеси в природних і техногенних мінералах//Вісн. НАН України. – 2018. – № 2. – С. 83–96.
19. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики. – М.: Недра, 1986. – 306 с.
20. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 400 с.
21. Юрель Г. Н., Ставрогин А. Н., Иванова Н. И. Микропреобразование песчаников различных литогенетических типов при высоких поровых давлениях//Литология и полезные ископаемые. – 1986. – № 6. – С. 100–122.
22. Fuller R. B. Synergetics. – N. – Y.: MacMillan, 1982. – 350 p.
23. Grinirov V., Zakharova L., Diedich I., Nazymko V. Distant interaction of rock mass clusters around underground opening//Mining of Mineral Deposits. – 2017. – Vol. 11. – № 2. – P. 79–83.
24. Starostina V. I., Sherbakov S. S., Sakys D. R. Synergetics in Geology – //https://www.sciencedirect.com/science/journal/18725791.
25. Voitenko Yu., Kravets V., Shukurov A., Drachuk O. Peculiarities of brittle and ductile materials destruction and deformation during the explosion of industrial shaped charges//Mining of Mineral Deposits. – Vol. 11. – № 2. – P. 12–20.

## REFERENCES

1. Balankin A. S. Self-organization and dissipative structures in the deformed body//Technical Physics Letters. – 1990. – V. 16. – Iss 7. – P. 14–20. (In Russian).
2. Voitenko Yu. I., Kovtun O. V. About the pre-outburst state of the coal and sandstone and the possible mechanism of coal and gas outburst process//Mineralni resursy Ukrainy. – 2018. – № 2. – P. 32–35. (In Russian).
3. Voitenko Yu. I., Kovtun O. V. About the viscous and brittle destruction of rocks upon impact and explosion//Visnyk NTUU "KPI": Seriya hirnytstvo. – 2017. – № 34. – P. 9–17 (In Ukrainian).
4. Voitenko Yu. I. Physical and technical bases of borehole geotechnologies with controlled fracturing. Thesis for doctor's degree, 5.15.11, Kiev, Ukraine, 2000. – 377 p. (In Ukrainian).
5. Hubykh I. B., Krupskiy Yu. Z., Derenevskiy A. M. Methods of liquidated wells oil bedding revision//Zbirnyk naukovykh prats UkrDHRI. – № 3. – P. 118–125 (In Ukrainian).
6. Ivanova N. I. The study of the microcracks of mechanically stressed quartz diorite in the presence of aqueous phases. In the book: Physico-chemical mechanics and lyophilic disperse systems. – Kiev: Naukova dumka, 1981. – Iss. 13. – P. 111–114. (In Russian).
7. Ivanova N. I., Kogan B. S., Pertsov N. V. The effect of the liquid phase in the formation of cracks in structures mechanically strained quartz diorite//Doklady AN SSSR. Geologija. – 1981. – Vol. 259. – № 6. – P. 1423–1428. (In Russian).
8. Karev V. I. Effect of the stress-strain state of rocks on the filtration process and well flow rate: Author's abstract. dis. ... Dr. Techn. Sciences: 01.02.04/IPMash RAN. – Sankt-Peterburg, 2010. – 34 p. (In Russian).
9. Kovzun I. G., Procenko I. T., Percov N. V. The role of chemical and physicochemical processes in preparation and the formation of properties of silicate suspensions//Kolloid. zhurnal. – 2001. – Vol. 63. – № 2. – P. 214–219. (In Russian).
10. Kochanov A. M., Odincov V. A. Wave prefracturing of solid rocks under blasting//Journal of Mining Science. – 2016. – 52. – № 6. – P. 38–48. (In Russian).
11. Makogon V. V. Some peculiarities of secondary terrigenous reservoirs of the central part of DDB on large depths//Mineralni resursy Ukrainy. – 2017. – № 4. – P. 24–28. (In Ukrainian).
12. Fracture Mechanics and strength of materials: In Handbook of 4 vol./UANSSR Fiziko-meh. in-t. – Kiev: Naukova dumka, 1988. – Vol. 2: Stress intensity factors in cracked bodies/M. P. Savruk, 1988. – 619 p. (In Russian).
13. Fracture Mechanics and strength of materials: In Handbook of 4 vol./UANSSR Fiziko-meh. in-t. – Kiev: Naukova dumka, 1988. – Vol. 1: Fundamentals of Fracture Mechanics/V. V. Panasyuk, A. E. Andrejkiw, V. Z. Parton. – 1988. – 488 p. (In Russian).
14. Mihajuk A. V., Voitenko Yu. I. Pulsed rupture of rocks. – Kiev: Naukova dumka, 1991. – 204 p. (In Russian).
15. Mihajuk A. V. Dilatancy and its influence on the properties of rocks under pre-limiting dynamic loads. – Kiev: Vipol, 2001. – 102 p. (In Russian).
16. Nonclassical problems of fracture mechanics: 4 vol./Ukrainian Academy of Sciences, Institute of Mechanics. – Kiev, 1991. – Vol. 2: Brittle fracture of materials with initial stresses/A. N. Guz. – 288 p. (In Russian).
17. Pysarenko H. S., Kvitka O. L., Umanskiy E. S. Strength of materials. – Kyiv: Logos, 2005. – 562 p. (In Ukrainian).
18. Prokopenko V. A., Kovzun I. H., Ulberh Z. R., Tsyhanovych O. A., Panko A. V. Physicochemical geomechanic and nanochemical processes in natural and technogenic minerals//Visn. NAN Ukrainy. – 2018. – № 2. – P. 83–96. (In Ukrainian).
19. Rodionov V. N., Sizov I. A., Cvetkov V. M. Fundamentals of geomechanics. – Moskva: Nedra, 1986. – 306 p. (In Russian).
20. Haken G. Synergetics. – Moskva: Mir, 1980. – 400 p. (In Russian).
21. Yurel G. N., Stavrogin A. N., Ivanova N. I. Micro-transformations of sandstones of various lithogenetic types at high pore pressures//Lithology and Mineral Resources. – 1986. – № 6. – P. 100–122. (In Russian).
22. Fuller B. R. Synergetics. – N. – Y.: MacMillan, 1982. – 350 p.
23. Grinirov V., Zakharova L., Diedich I., Nazymko V. Distant interaction of rock mass clusters around underground opening//Mining of Mineral Deposits. – 2017. – Vol. 11. – № 2. – P. 79–83.
24. Starostina V. I., Sherbakov S. S., Sakys D. R. Synergetics in Geology//https://www.sciencedirect.com/science/journal/18725791.
25. Voitenko Yu., Kravets V., Shukurov A., Drachuk O. Peculiarities of brittle and ductile materials destruction and deformation during the explosion of industrial shaped charges//Mining of Mineral Deposits. – Vol. 11. – № 2. – P. 12–20.

Р у к о п и с о т р и м а н о 15.04.2019.