

УДК 534.1: 539.375

doi: [10.31474/1999-981x-2018-2-46-56](https://doi.org/10.31474/1999-981x-2018-2-46-56)

А.Н. Рязанцев

Н.А. Рязанцев

## АУКСЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД КАК СЛЕДСТВИЕ КВАНТОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ И КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ УПРУГОСТИ

**Цель.** Экспериментальные исследования упругих параметров горных пород.

**Методы исследований.** Анализ существующих исследовательских работ, лабораторные эксперименты на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия конструкции ДонФТИ АН Украины.

**Результаты исследований.** В работе показано, что вопрос о нелинейности связи деформаций с внешней нагрузкой насчитывает более 300 лет. К середине XX века стало понятно, что эта связь на самом деле не степенная, а кусочно-линейная вследствие квантования деформаций. Ряд квантованных деформаций не зависит от химической природы вещества, определяется степенью возбуждения атомов (величиной главного и азимутального квантовых чисел) и подчиняется универсальному проявлению структурной гармонии – закону золотого сечения. Скачкообразное изменение модулей упругости, вызванное квантованием деформаций вследствие электронных и структурно-фазовых переходов, на макроуровне проявляется наличием ауксетических свойств. В работе приведены экспериментальные данные позволяющие утверждать, что горные породы являются классическими ауксетиками, в которых упругие параметры не являются константами, а существенно изменяются как по величине, так и по знаку, являясь структурно-чувствительными характеристиками сопротивляемости деформированию материалов. До предела сжимаемости (порога дилатансии) коэффициент поперечной деформации может принимать нулевые и отрицательные значения, что исключает наличие бокового распора в нетронутым горном массиве. В процессе нагружения вектор деформаций поворачивается относительно вектора напряжений таким образом, что при любом напряженном состоянии разрушение происходит сдвигом.

**Научная новизна.** Обнаружена изменчивость по величине и знаку упругих параметров горных пород.

**Практическая значимость.** Возможность учета ауксетических свойств горных пород при создании модели напряженного состояния нетронутого горного массива.

**Ключевые слова:** деформация, упругость, модуль, порода, квантование, ауксетик, свойства.

### Введение.

При решении задач геомеханики большинство исследователей используют математический аппарат теории упругости. Убежденность в том, что упругие параметры являются константами материалов, настолько глубоко внедрена в сознание, что сомневаться в этом считается неприличным. Линейный закон изменения смещений от внешней нагрузки был предложен Р. Гуком в 1678 году, а в 1694 году Я. Бернулли, вопреки этому закону, предложил степенную зависимость:

$$\Delta l = aP^n, \quad (1)$$

где  $\Delta l$  – удлинение образца;  $P$  – продольное усилие;  $a$  и  $n$  – экспериментальные параметры.

Вся последующая история исследования и малых, и больших деформаций была историей периодического пере открытия степенной зависимости Я. Бернулли, потому в научной литературе она имеет имена разных ученых. Открытие в середине XX века материалов с отрицательным коэффициентом поперечной деформации вызвало очередную волну сомнений в правомочности применения

линейной теории упругости для решения задач геомеханики. Для исследования закономерностей поведения горных пород и изучения связи деформаций с внешней нагрузкой в объемном поле сжимающих напряжений необходимо было проведение специальных экспериментов.

### Анализ последних исследований.

Детально результаты работ европейских научных школ, начиная с Р. Гука и до 60-х годов XX века, рассмотрены в монографии Дж. Ф. Белла [1,2], где показано, что уже в 1835 году стала очевидной нелинейность зависимости и больших, и малых деформаций от внешних нагрузок. В 1849 году Британская королевская комиссия по железу даже «отменила» закон Гука и предложила своим инженерам в расчетах пользоваться зависимостью в виде квадратичной параболы. В 1824-1844 гг. И. Ходкинсон на экспериментах показал, что для дерева, железа, чугуна, камня зависимость не только нелинейная, но и что сама нелинейность при растяжении проявляется сильнее, чем при сжатии. Для

реальных материалов коэффициент нелинейности изменяется от 0,02 до 0,7.

Несмотря на огромное количество экспериментальных и теоретических работ, подтверждающих нелинейный характер зависимости деформаций от нагрузки, единственным учебником для инженеров, основанном на нелинейной зависимости, является «Сопромат» Карла фон Баха, изданный в Германии на рубеже XIX и XX веков. В современном сопромате введено понятие о трех пределах в области малых деформаций (предел пропорциональности, предел упругости и предел текучести). При этом, за предел текучести была принята остаточная деформация 0,2%. Для целого ряда высокопрочных и хрупких материалов диаграмма является нелинейной на всем протяжении, потому было введено понятие «секущий модуль», который равен тангенсу угла наклона секущей, проведенной из начала диаграммы через точку предельной нагрузки, которая не имеет однозначности, а сам модуль теряет физический смысл. В экспериментальной механике деформируемого твердого тела показано, что, независимо от того удастся или не удастся наблюдать остаточные деформации, они существуют при любых малых деформациях, предел пропорциональности равен нулю, а критерием определения текучести является не уровень фиксированной остаточной деформации, а смена характера ее возрастания. Ступенчатое (эффект Савара-Массона) и зубчатое (эффект Портвена-Ле Шетелье) изменение деформаций сегодня известны большинству специалистов, однако физический аспект этих явлений практически не изучен.

В [3] была выдвинута концепция деформационных переходов, под которыми автор понимает перестройку структуры вещества. Вынужденный объемный переход при этом ассоциируется с пластическим течением, фронтальный переход – с прерывистым деформированием, а лавинный переход – с динамическими явлениями. Остаточная деформация, по мнению автора, возникает за счет изменения формы, а изменение объема остается упругим. Преобразование упругой деформации в остаточную возникает, когда амплитуда колебаний атомов и молекул достигает определенного предела, а понятия

предельных напряжений или деформаций не имеют физического смысла.

Подытоживая сказанное выше, следует признать, что большой объем экспериментальных и теоретических исследований уже к середине XX века заставлял окончательно усомниться в правомочности применения линейной теории упругости при деформировании и разрушении материалов, особенно при объемном или сложном напряженном состоянии. Американским физиком Джеймсом Фредериком Беллом [1] было показано, что модуль сдвига материалов в процессе нагружения изменяется по зависимости:

$$G = G_0 \left(\frac{2}{3}\right)^{\ell/2+p/4}, \quad (2)$$

где  $G_0 = 2,89 \cdot 10^5$  МПа – линейный модуль сдвига для изотропного твердого тела в нулевой точке;

$\ell = 1, 2, 3, \dots$  – любое целое квантовое число;

$p = 0$  или  $1$  – коэффициент структуры ( $0$  – для монокристаллов,  $1$  – для поликристаллов).

Дискретный ряд сдвиговых деформаций, при которых модуль сдвига изменялся скачком, для всех испытанных поликристаллических твердых тел (в основном для 54-х металлов и сплавов) имел вид:  $\gamma_N = 0,046; 0,127; 0,232; 0,350; 0,520; 0,780; 1,176; 1,765$  и описывался формулой:

$$\gamma_N = \left(\frac{2}{3}\right)^{\ell/2+p/4}. \quad (3)$$

Получен также дискретный ряд восьми линейных осевых деформаций перехода

$$\varepsilon_N = \frac{\gamma_N}{m}, \quad (4)$$

где  $m = 3,06$  – безразмерная константа, зависящая от отношения касательного напряжения в монокристалле к осевому напряжению в поликристалле.

Ряд линейных деформаций имеет вид:  $\varepsilon_N = 0,015; 0,041; 0,076; 0,114; 0,171; 0,256; 0,385; 0,577$ . Для деформаций кручения этот ряд выглядит следующим образом:  $s_N = 0,026; 0,072; 0,132; 0,198; 0,294; 0,444; 0,667; 1,00$  и описывается формулой:

$$s_N = \frac{\gamma_N}{n}, \quad (5)$$

где  $n = 1,765$  – коэффициент поликристалличности.

При рассмотрении лишь активной части деформации (только при возрастании нагрузки)

$$\varepsilon_N \sigma = \gamma_N \tau = s_N S. \quad (6)$$

По традиции диаграммы «нагрузка-деформация» изображают в виде плавных гладких кривых. Однако, как теперь установлено, пластическая деформация – это последовательный ряд структурных переходов в твердом теле. Изображение диаграмм гладкими предполагает, что этот ряд непрерывный. Квантование же модулей упругости по Дж.Ф. Беллу предполагает кусочно-линейную упругость, а форма диаграмм должна иметь вид ломаной кривой.

Новые данные, полученные во второй половине XX, начале XXI века, связанные с обнаружением веществ – ауксетиков, только укрепили эти предположения [4].

В 1948-1955 гг. исследования О.Я. Берга на бетонных призмах показали, что при нагрузках 0,75 от разрушающих коэффициент поперечной деформации превышает 0,5 и достигает 0,75-0,76. Первые достоверные экспериментальные данные об отрицательных значениях коэффициента поперечной деформации в кристаллах кварца в области высоких температур опубликованы в 1962 году. Потом, в 1963 году А. Гарбер зарегистрировал отрицательные значения коэффициента поперечной деформации в модифицированном пиролитическом графите. Позже описаны анизотропные армированные композиты с коэффициентом поперечной деформации  $\nu \sim -2$ .

Детальный обзор о материалах с отрицательным коэффициентом поперечной деформации, которые названы ауксетиками, дан в [4].

Особое место среди ауксетиков занимают пороматериалы. Показано что с увеличением объемного сжатия коэффициент поперечной деформации уменьшается до  $-0,7$ . При больших сжимающих деформациях начинается процесс схлопывания пор и ячеек, вызывая несоответствие между линейной теорией и экспериментальными данными.

Среди ауксетических пористых материалов следует выделить класс анизотропных пористых полимеров с

размером пор меньше 150 мкм, выявленных К. Эвансом. При относительной деформации образцов политетрафторэтилена (ПТФЭ) около 15% он получил  $\nu \sim -12$ . Как будет показано ниже, к классическим поропластам относятся и угольные пласты с  $\nu$  до  $-8$ .

Среди кристаллических веществ выделяют аксиально- и неаксиально-ауксетические монокристаллы. Аксиально-ауксетическими называют монокристаллы, в которых отрицательные значения коэффициента поперечной деформации наблюдаются вдоль кристаллографического направления  $\langle 100 \rangle$ . Неаксиально-ауксетическими называют монокристаллы, в которых отрицательные значения коэффициента поперечной деформации наблюдаются по другим направлениям, не совпадающим с  $\langle 100 \rangle$ . К аксиально-ауксетическим относятся монокристаллы ромбоэдрических фаз мышьяка и висмута, гексагональных фаз цинка, кадмия, бериллия [5]. Гранецентрированные кубические (ГЦК) и объемно-центрированные кубические (ОЦК) фазы простых металлов имеют обычно неаксиально-ауксетические свойства. Нужно отметить, что 67% кубических кристаллов таблицы Менделеева имеют отрицательный коэффициент поперечной деформации (литий – 0,54; натрий – 0,44; калий – 0,42; кальций – 0,27; медь – 0,13 и т.д.) [6]. В ауксетиках модули упругости в процессе нагружения изменяются в пять и более раз.

Ауксетическими свойствами обладают не только металлы и сплавы. Отрицательные значения коэффициента поперечной деформации обнаружены в более чем 10 полиморфных модификациях  $\text{SiO}_2$ , в частности в тетрагональных монокристаллах кристобалита [7]. Как будет показано ниже, классическим ауксетиком являются песчаники, алевролиты, аргиллиты, основным породообразующим минералом которых является кварц. Есть сведения об ауксетических свойствах гранитов, кварцитов, порфиринов [8]. К ауксетикам относятся цеолиты [9], а также многокомпонентные системы, в которых отрицательные значения коэффициента поперечной деформации обусловлены не структурно-механическими особенностями строения материалов, а физико-химическими взаимодействиями и являются следствием

фазовых переходов (гидрогели, жидкие кристаллы и др.) [10].

Хотя, на первый взгляд, отрицательность коэффициента поперечной деформации противоречит здравому смыслу, возможность существования таких материалов подтверждается известным соотношением теории упругости:

$$\nu = (3K - 2G) / (6K + 2G), \quad (7)$$

где  $K$  и  $G$  – соответственно модули объемного сжатия и сдвига.

Из этого соотношения следует, что отрицательные значения коэффициента поперечной деформации возможны при условии  $G > 3/2K$ , когда модуль сдвига превышает модуль объемного сжатия больше, чем на 50%. Это возможно, когда материал при деформации сохраняет геометрические пропорции (форму), но изменяет свой объем.

Для описания упругих свойств неупорядоченных систем с хаотичной структурой, к которым относятся композиты, горные породы, а также фазовых переходов, в настоящее время широко используют перколяционные модели. Показано, что если линейный размер перколяционной решетки  $L < 0,2 \xi$  (где  $\xi$  – длина корреляции), то коэффициент поперечной деформации отрицательный, а если  $0,2L > \xi$ , то положительный. При  $L/\xi \rightarrow \infty$  коэффициент поперечной деформации принимает граничное значение  $0,08 \dots 0,04$  и не зависит от соотношения локальных упругих характеристик; при  $L/\xi \rightarrow 0$  получаем  $\nu = -1/3$ , а при  $L/\xi = 5$   $\nu = 0$ . Для установления связи макроскопических упругих параметров среды со структурой материала была постулирована зависимость:

$$G/K = Z/8, \quad (8)$$

где  $Z$  – координационное число перколяционной решетки.

Для  $d$ - мерной изотропной среды формула имеет вид [11]:

$$\nu = (dK - 2G) / (d(d-1)K + 2G), \quad (9)$$

где  $d$ - интегральная размерность пространства.

Анализ этой формулы предусматривает, что во фрактальных средах

при  $Z < 4d$  коэффициент поперечной деформации должен быть положительным, при  $Z = 4d$  – равен нулю, а при  $Z > 4d$  должен быть отрицательным.

В [12] для адекватного определения коэффициента поперечной деформации предлагается его связь с параметром Грюнайзена, который является мерой ангармонизма колебаний атомов и молекул твердых тел. Авторами получены следующие формулы:

$$\gamma = \frac{3(1+\nu)}{2(2-3\nu)}; \quad \nu = \frac{\frac{4}{3}\gamma - 1}{2\gamma + 1}, \quad (10)$$

где  $\nu$  – коэффициент поперечной деформации;

$\gamma$  – параметр Грюнайзена.

Указанные зависимости свидетельствуют о том, что степень ангармонизма колебаний атомов в положении равновесия ( $\gamma$ ) определяет механизм поперечной деформации ( $\nu$ ). При  $1,29 \leq \gamma \leq 2,63$  имеем интервал значений коэффициента поперечной деформации  $0,2 \leq \nu \leq 0,4$ , что соответствует наиболее часто встречающимся экспериментальным величинам параметра Грюнайзена. При  $\gamma = 0,75$   $\nu = 0$  (продольное сжатие не сопровождается поперечным растяжением). При  $\gamma = 0$   $\nu = -1$  – соответствует «гармоническому кристаллу» без затухания колебаний. Максимально возможное положительное значение  $\nu = 0,67$  может быть достигнуто в условиях «неограниченного» ангармонизма  $\gamma \rightarrow \infty$ .

Таким образом, непостоянство упругих параметров твердых тел и наличие в них ауксетических свойств доказано и экспериментально и теоретически. В связи с этим, возникает необходимость детального изучения этих свойств в осадочных породах Донбасса в условиях не равнокомпонентного объемного сжатия.

### Цель работы.

Детальное исследование упругих параметров осадочных горных пород Донбасса на основании лабораторных испытаний их образцов на установке не равнокомпонентного трехосного сжатия.

### Методы исследования.

Для исследования характера изменения упругих характеристик горных пород

проведены испытания призматических образцов угля, аргиллита, алевролита и песчаника на установке не равнокомпонентного трехосного сжатия (УНТС) конструкции ДонФТИ АН Украины и разработан математический аппарат обработки экспериментальных данных.

#### Изложение основного материала.

Испытания образцов горных пород проводились с шагом изменения внешней нагрузки 2 МПа, линейные деформации фиксировались механическими датчиками часового типа с точностью  $10^{-6}$  м.

На рис. 1 показано изменение модуля объемного сжатия горных пород, как тангенса угла наклона диаграммы «среднее напряжение – объемная деформация». Аналогично на рис. 2 показано изменение модуля сдвига горных пород как тангенса угла наклона диаграммы «октаэдрическое касательное напряжение – октаэдрическая касательная (сдвиговая) деформация». Приведенные диаграммы хорошо отражают изменения относительных деформаций в процессе нагружения. На них хорошо видны переломы со скачкообразным изменением модулей упругости, свидетельствующих об электронных и структурно-фазовых переходах в минералах, составляющих горные породы.

На рис. 1 хорошо видны структурно-фазовые переходы первого и третьего рода. Переходы первого рода идут с уменьшением объема при постоянном давлении, а третьего рода (так называемые критические переходы) – с увеличением объема при нарастающем давлении. Интересно поведение некоторых образцов угля и аргиллита на рис. 1а и 1б, когда видимая дилатансия (увеличение объема при структурно-фазовом переходе третьего рода) отсутствует. На самом деле на этих участках наблюдается знакопеременная объемная деформация практически при постоянном давлении. О структурно-фазовых переходах второго рода свидетельствуют скачкообразные изменения модуля всестороннего сжатия на рис. 1 и модуля сдвига на рис. 2.

Рассмотрим более детально начальную и конечную стадии деформирования образцов. На начальной стадии деформирования объемная деформация в

большинстве случаев идет с интенсивным уменьшением объема.



**Рис. 1.** Диаграммы «среднее напряжение – объемная деформация» для угля (а), аргиллита (б), песчаника (в) – через дробь показано соотношение промежуточного  $\sigma_2$  и минимального  $\sigma_3$  напряжений



Рис. 2. Диаграммы «октаэдрическое касательное напряжение – октаэдрическая касательная (сдвиговая) деформация» для угля (а), аргиллита (б), песчаника (в)

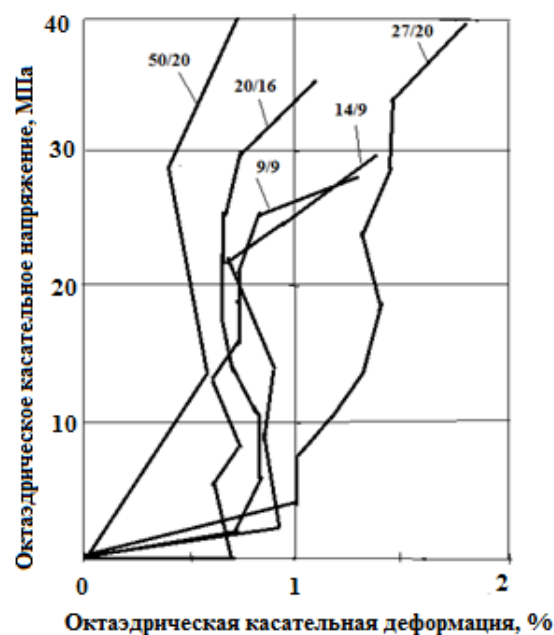


Рис. 3. Знакопеременная сдвиговая деформация в аргиллитах на начальной стадии деформирования

Перемена знака деформаций наблюдается после достижения предела сжимаемости. Интенсивное уменьшение объема идет за счет уплотнения межслоевых расстояний в слоистых, ленточных и цепочечных силикатах, залечивания имеющихся пор и трещин, поэтому сдвиги не выражены, и их величина не превышает 2% (рис.3). Поэтому на начальной стадии деформирования модуль сдвига часто больше модуля объемного сжатия и коэффициент поперечной деформации имеет отрицательные значения (рис.4). После достижения порога дилатансии (предела сжимаемости), происходит структурно-фазовый переход третьего рода с (уменьшение объема сменяется увеличением). При этом модуль объемного сжатия претерпевает разрыв и меняет знак.

Что касается сдвиговой деформации, то знакопеременная деформация наблюдается вначале деформирования (рис.3), а после достижения предела сжимаемости (на пред разрушающей стадии) она неуклонно нарастает (рис.2). В момент перехода структура крайне разупорядочена, сопротивление сдвигу снижается, поэтому вероятность и интенсивность сдвигов резко возрастает, что приводит к пластическому течению и разрушению, либо, в начале, к структурно-фазовому переходу первого рода



с уменьшением объема, а потом к изобарному пластическому течению.

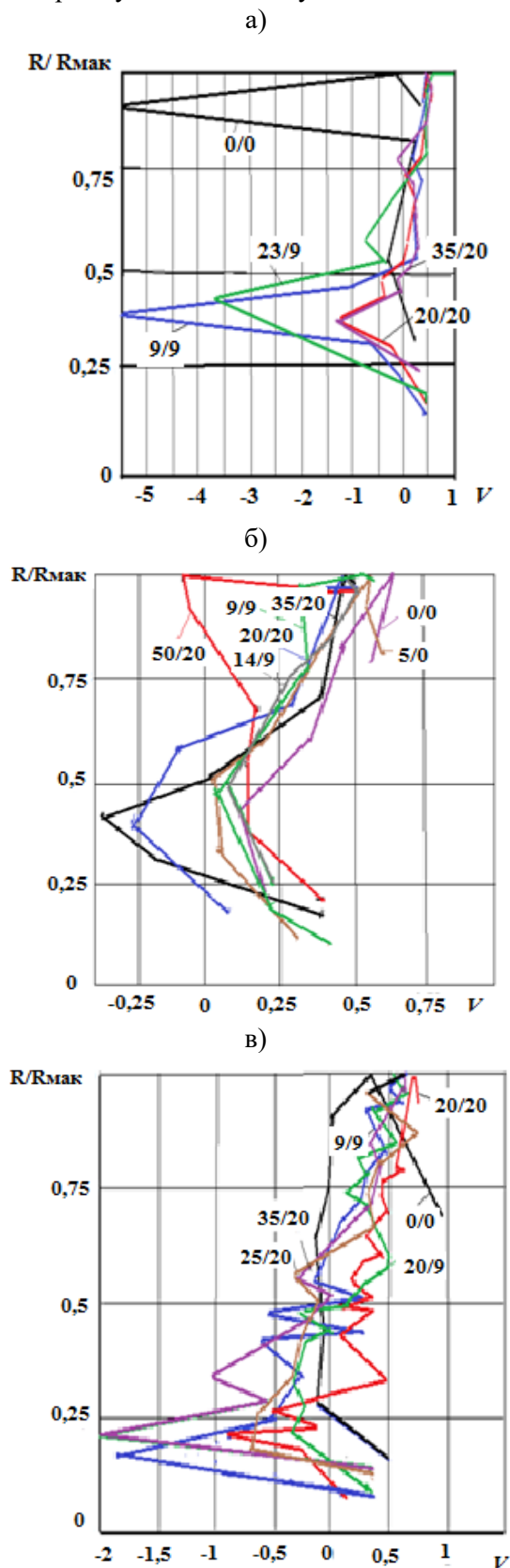


Рис. 4. Отрицательные значения коэффициента поперечной деформации в горных породах: а – уголь; б – аргиллит; в – песчаник

Таким образом, упругие параметры горных пород не являются константами материалов, а являются их структурно-чувствительными характеристиками сопротивляемости деформированию. Их скачкообразные изменения в процессе механического нагружения свидетельствуют

о структурно-фазовых переходах второго рода. Отрицательные значения модуля объемного сжатия и коэффициента поперечной деформации больше 0,5 свидетельствуют о структурно-фазовом переходе третьего рода (уменьшение объема при сжатии сменяется его увеличением). Знакопеременные значения модуля сдвига и отрицательные значения коэффициента поперечной деформации свидетельствуют об отсутствии формоизменения (или очень большом сопротивлении сдвигу), а также о структурно-фазовом переходе первого рода (изобарном уменьшении объема).

На начальной стадии деформирования при нагрузках 0,1...0,2 от разрушающих коэффициент поперечной деформации горных пород положительный и колеблется в пределах 0,37-0,42. При дальнейшем нагружении он начинает уменьшаться, принимая в том числе и отрицательные значения. До предела сжимаемости (порога дилатансии) породы ведут себя как классические ауксетики. На пределе сжимаемости при нагрузках 0,7-0,8 от разрушающих происходит структурно-фазовый переход третьего рода (с увеличением объема) либо первого рода (с уменьшением объема), коэффициент поперечной деформации снова приобретает положительные значения, быстро возрастает до 0,5 и больше, после чего наступает разрушение. В угольных пластах, как классических поропластах, после структурно-фазового перехода третьего рода сразу происходит схлопывание пор с уменьшением объема и уголь разрушается, потому отрицательные значения коэффициента поперечной деформации до -8 могут наблюдаться непосредственно перед разрушением.

#### Обсуждение результатов.

Отрицательность коэффициента поперечной деформации в горных породах связана, как показано выше, с ангармонизмом колебаний атомов и молекул,

когда параметр Грюнаизена меньше 0,75, с фрактальностью горных пород, когда изменение объема возможно без изменения формы (порода ведет себя как конденсатор тепловой энергии). Характерно, что ряд дискретных деформаций, установленный Дж.Ф. Беллом, при которых происходят структурно-фазовые переходы второго рода со скачкообразным изменением модулей упругости, наблюдается и в горных породах. В связи с изменением деформационного состояния в процессе нагружения (вектор деформации поворачивается относительно вектора напряжений рис.5), при объемном не равнокомпонентном сжатии дискретный ряд деформаций является смешанным и представляет собой чередование нормальных, сдвиговых и вихревых деформаций: 0,35; 0,57; 0,92; 1,1; 1,5; 2,4; 3,0; 3,7; 4,2; 4,9; 6,3; 7,9; 10,1; 11,2; 12,7; 13,7; 16,4; 20,9; 23,6%.

Нормальная относительная деформация для произвольного возбужденного состояния, обусловлена электронными переходами и может быть определена по формуле:

$$\varepsilon_N = \pm \left[ \frac{3n^2 - \ell(\ell+1)}{3n_0^2 - \ell_0(\ell_0+1)} - 1 \right],$$

где  $n, \ell$  - соответственно главное и азимутальное квантовые числа деформированного состояния;  $n_0, \ell_0$  - квантовые числа исходного состояния.

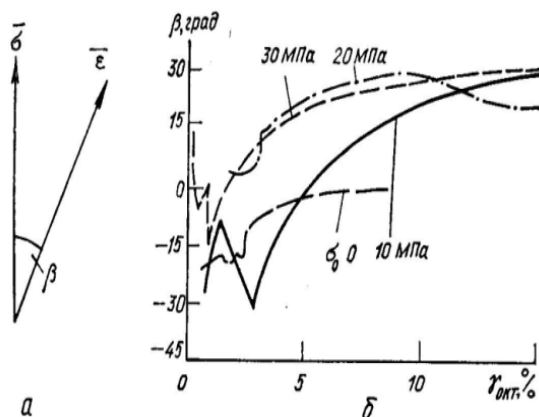


Рис. 5. Зависимость угла поворота вектора деформации относительно вектора напряжения при постоянном виде напряженного состояния

$$\mu_\sigma = 1 (\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3)$$

Однако ряд нормальных, сдвиговых и вихревых деформаций является единым и подчиняется универсальному проявлению

структурной гармонии – закону золотого сечения:

$$\gamma_N = \left(\frac{1}{\Phi}\right)^{\ell/2+1/4}; \quad \sigma_N = \Phi \left(\frac{1}{\Phi}\right)^{\ell/2+1/4}; \\ \varepsilon_N = \Phi^2 \left(\frac{1}{\Phi}\right)^{\ell/2+1/4};$$

где  $\Phi = 1,618$  – число Фидия (золотое число).

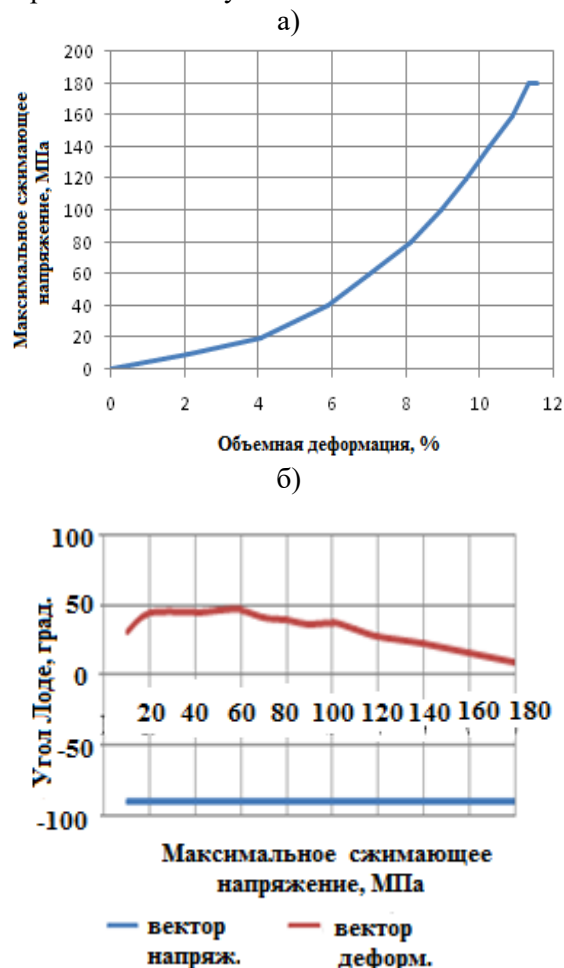
Деформирование и разрушение горных пород идет, в основном, за счет изменения азимутального квантового числа (реализации сдвиговых и вихревых деформаций), нормальные (отрывные) разрушающие деформации требуют больших возбуждений и изменения главного квантового числа, потому оказываются энергетически невыгодными и реализуются только в сильно дефектных материалах в момент структурно-фазового перехода 1-го рода. На рис.6 показано разрушение угля при обобщенном отрыве, когда  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 = 12,5$  МПа. Структурно-фазовый переход происходит при давлении 180 МПа и сопровождается уменьшением объема на 0,22%. Если учесть, что распространение деформационных и электромагнитных колебаний происходит по одним законам, и угол Лоде определять как  $\varphi_\varepsilon = \arcsin \mu_\varepsilon$ , вначале вектор деформации отстает по фазе от вектора напряжений на  $120^\circ$ . В процессе нагружения он поворачивается сначала влево на угол  $20^\circ$ , увеличивая отставание по фазе до  $140^\circ$ , затем наступает инверсия вращения вектора деформаций на правостороннее и, в момент разрушения, он почти перпендикулярен вектору напряжений и близок к обобщенному сдвигу. Следует отметить, что не зависимо от вида напряженного состояния, вектор деформаций всегда поворачивается на определенный угол, чтобы разрушение происходило по сдвиговому механизму.

### Выводы.

Таким образом, осадочные горные породы являются классическими ауксетиками и ведут себя аналогично композитам (аргиллиты, алевролиты), поропластам (уголь) или веществам с полиморфизмом (песчаник). Диаграмма «нагрузка- деформация» имеет кусочно-линейный вид. Отрицательность коэффициента поперечной деформации в горных породах связана с ангармонизмом



колебаний атомов и молекул, и с фрактальностью горных пород, когда изменение объема происходит без изменения формы. Ряд дискретных деформаций, при которых происходят структурно-фазовые переходы второго рода со скачкообразным изменением модулей упругости подчиняется универсальному проявлению структурной гармонии – закону золотого сечения.



**Рис. 6.** Разрушение угля при обобщенном отрыве  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 = 12,5$  МПа с уменьшением объема (а) и поворот вектора деформаций в процессе нагружения (б)

Деформирование и разрушение горных пород идет, в основном, за счет реализации сдвиговых и вихревых деформаций, отрыв энергетически невыгоден. Сдвиговые деформации имеют ротационный характер. Вектор деформации поворачивается вокруг вектора напряжений, при этом он может как отставать от вектора напряжений (запасая энергию), так и опережать его (проявляя индукционные свойства).

В процессе деформирования горных пород в объемном поле сжимающих

напряжений сообщаемая породе энергия изотермического и адиабатического сжатия (теплота) достигает критических значений, при которых происходят структурно-фазовые переходы 1-го, 2-го и 3-го рода, которые на макроуровне проявляются как ауксетические свойства. Локальные переходы 1-го и 3-го рода приводят к разрушению. Разрушение – это локальный структурно-фазовый переход 1-го (с уменьшением объема) или 3-го (с увеличением объема) рода, который осуществляется посредством последовательно-параллельного ряда структурно-фазовых переходов 2-го рода.

### Список литературы

1. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. В 2-х частях. Часть I. Малые деформации: Пер. с англ. под ред. А.П. Филина М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит.-ры, 1984.- 600 с. Часть II. Конечные деформации: Пер.с англ. под ред. А.П. Филина. М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит.-ры, 1984.- 432 с. (Encyclopedia of physics, v. /a/1, Mechanics of solids? Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 1973.)
- 2.Рязанцев А.Н. Структурно-фазовые переходы в горных породах и соответствие относительных деформаций на микро- и макроуровнях. Збірник наукових праць «Фізикотехнічні проблеми гірничого виробництва». Вип.15.«Фізичні, геомеханічні та технологічні проблеми видобутку корисних копалин». Донецьк: Інститут фізики гірничих процесів НАН України, 2012. С.42-52.
3. Востриков Ю.Н. О формах и механизме образования остаточной деформации (концепция деформационных переходов и новая парадигма сейсмологии). Депонирована в ВИНТИ 21.04.11, №189. Новосибирск, 2011. 286с.
- 4.Конек Д.А., Войцеховски К.В., Плещачевский Ю.М., Шилько С.В. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (обзор): механика композитных материалов и конструкций. М.: 2004. Том 10. №1. С.35-69.
5. Lubarda V.A. Meyers M.A. On the negative Poisson ratio in monocrystalline zinc. Scripta materialia, 1999, v. 40, № 8, pp. 975-977.
- 6.Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Модуль Юнга кубических ауксетиков: письма о материалах. М.: ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2011. Т.1.С.127-132.
- 7.Kimizuka H., Kaburaki H., Kogure Y. Mechanism for negative Poisson ratios over the a-b transition of cristobalite, SiO<sub>2</sub>: a molecular-dynamics study. Phys. Rev. Lett. 2000, v. 84, № 24, pp. 5548-5551.
8. Кулиев Г.Г. Определение коэффициента Пуассона в напряженных средах. ДАН РАН, 2000. т. 370, № 4. С.534-537.
9. Overaker D.W., Lagrana N.A., Cuitiño A.M. Finite element analysis of vertebral body mechanics with a nonlinear microstructural model for the trabecular core J. Biomech. Eng., 1999, v. 131, pp. 542-550.

10. Smirnov M.B., Mirgorodsky A.P. Lattice-dynamic study of the a-b phase transition of quartz: soft mode behavior and elastic anomalies. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, v. 78, № 12, pp. 2413-2416.

11. Wojciechowski K.W. Negative Poisson ratios at negative pressures. *Mol. Phys. Reports*, 1995, v. 10. pp. 129-136.

12. Беломестных В.Н., Теслева Е.П. Коэффициент Пуассона и параметр Грюнайзена твердых тел. *Известия Томского политехнического университета*, 2003. Т.306. №5. С.8-12.

## References

1. Bell, James Frederick Experimental fundamentals of mechanics of deformable solids Per. from English / JF Bell. - M.: Science, 1984 -Part 1: Small deformations: Per. from English - 1984. - 564 p. Part 2: Final deformation. - 1984. - 501 p (in English).

2. Ryzantsev A.N. (2012) *Strukturno-fazovyye perehody v gornyykh porodakh i sootvetstvie otositelnykh deformatsiy na mikro- i makrourovnyah* [Structural phase transitions in rocks and correspondence of relative deformations at micro and macro levels]. *Zbírnik naukovih prats «Fizikotekhnichni problemi glirni-chogo virobnistva»*. Vip.15. «Fizichni, geomehanichni ta tehnologichni problemi vidobutku korisnih kopa-lin». Donetsk: Institut fiziki glirnichih protsesiv NAN Ukraine, pp.42-52 (in Ukrainian).

3. Vostrikov Yu.N. (2011) *O formah i mehanizme obrazovaniya ostatochnoy deformatsii (kontseptsiya deformatsionnykh perehodov i novaya paradigma seysmologii)*. [On the forms and mechanism of the formation of residual deformation (the concept of deformation transitions and the new paradigm of seismology)]. *Deponirovana v VINITI* 21.04.11, № 189. Novosibirsk. 286p (in Russian).

4. Konek D.A., Voytsehovskiy K.V., Pleskachevskiy Yu.M., Shilko S.V. (2004) *Materialy s otritsatelnyim*

*koefitsientom Puassona (obzor)*. [Materials with a negative Poisson's ratio (review)]. *Mekhanika kompozitnykh materialov i konstruktivnykh*. Moscow, Russia. Tom 10, №1, pp. 35-69 (in Russian).

5. Lubarda V.A. Meyers M.A. (1999). *On the negative Poisson ratio in monocrystalline zinc*. *Scripta materialia*, v. 40, № 8, pp. 975-977 (in English).

6. Goldshteyn R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Modul (2011) *Yunga kubicheskikh auksetikov*. [Young's modulus of cubic auxetiks]. *Pisma o materialakh*. Moscow: IPM im.A.Yu. Ishlinskogo RAN. T.1. pp.127-132 (in Russian)

7. Kimizuka H., Kaburaki H., Kogure Y. (2000) *Mechanism for negative Poisson ratios over the a-b transition of cristobalite, SiO<sub>2</sub>: a molecular-dynamics study*. *Phys. Rev. Lett.*, v. 84, № 24, pp. 5548-5551 (in Japanese).

8. Kuliev G.G. (2000) *Opreделение koefitsienta Puassona v napryazhennykh sredakh*. [Determination of Poisson's ratio in stressed environments.] *DAN RAN*, t. 370, № 4, pp.534-537 (in Russian).

9. Overaker D.W., Lagrana N.A., Cuitiño A.M. (1999). *Finite element analysis of vertebral body mechanics with a nonlinear microstructural model for the trabecular core J. Biomech. Eng.*, v. 131, pp. 542-550.

10. Smirnov M.B., Mirgorodsky A.P. (1997). *Lattice-dynamic study of the a-b phase transition of quartz: soft mode behavior and elastic anomalies*. *Phys. Rev. Lett.*, v. 78, № 12, pp. 2413-2416.

11. Wojciechowski K.W. (1995). *Negative Poisson ratios at negative pressures*. *Mol. Phys. Reports*, v. 10. pp. 129-136 (in Polish).

12. Belomestnykh V.N., Tesleva E.P. (2003). *Koefitsient Puassona i parametr Gryunayzena tverdykh tel*. [Poisson's ratio and the Grüneisen parameter of solids.]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta*. T.306.- №5, pp.8-12 (in Russian).

Надійшла до редакції 14.01.2018  
Рецензент с.н.с., доц. В.М. Куперубов

**Рязанцев Антон Николаевич** – асистент кафедры разработки пластовых месторождений индустриального института ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, Донецкой обл. 85300, Украина).

E-mail: rpm.kaf@ukr.net

**Рязанцев Николай Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры разработки пластовых месторождений индустриального института ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, Донецкой обл. 85300, Украина).

E-mail: rpm.kaf@ukr.net

## АУКСЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД ЯК НАСЛІДОК КВАНТУВАННЯ ЕФОРМАЦІЙ ТА ШМАТОЧНО-ЛІНІЙНОЇ ПРУЖНОСТІ

**Мета.** Експериментальні дослідження пружних параметрів гірських порід.

**Методи досліджень.** Аналіз існуючих досліджувальних робіт, лабораторні експерименти на установці нерівнокомпонентного триосного стискання конструкції ДонФТІ АН України.

**Результати досліджень.** В роботі показано, що питання про не лінійність зв'язку деформацій з зовнішнім навантаженням нараховує більше 300 років. В середині ХХ століття стало зрозумілим, що цей зв'язок насправді є не ступеневим, а шматочно-лінійним внаслідок квантування деформацій. Ряд квантованих деформацій не залежить від хімічної природи речовини, визначається ступенем збудження атомів (величиною головного і азимутального квантових чисел) і підкоряється універсальному прояву структурної гармонії – закону золотого перетину. Стрибкоподібні зміни модулів пружності, викликані квантуванням деформацій внаслідок електронних і структурно-фазових переходів, на макрорівні проявляються наявністю ауксетичних властивостей. В роботі наведені експериментальні дані, які дозволяють стверджувати, що гірські породи є класичними ауксетиками, в яких пружні

параметри не є константами, а суттєво змінюються в процесі навантаження як за величиною, так і знаком, залишаючись структурно-чутливими характеристиками опору деформуванню матеріалів. До межі стиснення (порогу дилатансії) коефіцієнт поперечної деформації може приймати нульові і від'ємні значення, що виключає наявність бокового відпору в незайманому гірському масиві. В процесі навантаження вектор деформацій повертається щодо вектора напружень таким чином, що при будь-якому напруженому стані руйнування відбувається зрушенням.

**Наукова новизна.** Виявлена мінливість за величиною і знаком пружних параметрів гірських порід.

**Практична значимість.** Можливість врахування ауксетичних властивостей гірських порід при створенні нової моделі напруженого стану незайманого гірського масиву.

**Ключові слова:** деформація, пружність, модуль, порода, квантування, ауксетик, властивості.

**Рязанцев Антон Миколайович** – асистент кафедри розробки пластових родовищ індустріального інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецької обл. 85300, Україна).  
E-mail: rpm.kaf@ukr.net

**Рязанцев Микола Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри розробки пластових родовищ індустріального інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецької обл. 85300, Україна).  
E-mail: rpm.kaf@ukr.net

### AUXETIC PROPERTIES OF MOUNTAIN BREEDS AS A CONSEQUENCE QUANTIZATION OF DEFORMATIONS AND FINE-LINEAR ELASTICITY

**The purpose.** The study of the elastic parameters of the rocks involumetric field of compressive stresses.

**The methods.** Analytical studies and laboratory experiments.

**The results.** Analytical review of the literature data attests to the fact that the idea of non -linear link between the stresses and the deformations has existed more than 300 years. As long ago the middle of the twentieth century, it was shown that the deformations and the elastic modules are quantized and they do not depend on the chemical nature of the matter. After the identification of the materials with negative coefficient of transverse deformation, the confidence of the piecewise linear elasticity has only grown. It is found that most materials have auxetic properties, in which the elastic parameters are not constants of the material. The paper presents experimental data which permit to confirm that the rocks, along with the composites, foam plastics, the substances with the polymorphism, etc., are classical auxetics. In the auxetics, the elastic modules and the coefficient of transverse deformation, in the process of the loading is changed abruptly, taking negative values as well. Coal detects the properties of classical poroplast with the coefficient of transverse deformation to the point of "minus" 8. The sandstones, in which the main rock-forming mineral is quartz, behave like classical minerals with the polymorphism (the coefficient of transverse deformation is to the point of "minus" 2), the claystone and the silt stone behave like the composites and the minerals with the polymorphism (the coefficient of transverse deformation is to the point of "minus" 0.5). To describe the properties of the rocks, the piecewise-linear dependence is proposed, at which electronic and structural-phase transitions of the second kind with abrupt changes of the elastic parameters take place in characteristic points of the quantized deformations. To determine the quantized deformations in which the elastic parameters change abruptly, the number of Phidias, the principal and the azimuth quantum numbers are proposed to use. The elastic parameters are not the constants of the materials, but they are string-sensitive characteristics of the resistance to the deformation and the distraction. The destruction is local structural-phase transition of the first or third kind due to parallel-sequential series of structural-phase transitions of the second kind. In the case of critical transition of the third kind, the destruction proceeds with the increase of the volume, and during the transition of the first kind it proceeds with the decrease of the volume.

**The originality.** It has been established that sedimentary rocks are classical auxetics. The elastic parameters are not the constants of the materials. To the threshold of the dilatancy (compressibility limit), the coefficient of transverse deformation is negative.

**Practical value.** The negativity of the coefficient of transverse deformation leads to the conclusion about the absence of horizontal stress of solid rock massif but the variability of the elastic modules lead to the piecewise linear dependence of the deformations from the loading.

**Key words:** the deformation, the elasticity, the modulus, the rocks, the auxetics, the quantization, the properties.

**Ryazantsev Anton** - The assistant to faculty of the development of bedded deposits Industrial Institute "Donetsk National Technical University", (square Shibankova, 2, Pokrovsk, 85300, Ukraine).

E-mail: rpm.kaf@ukr.net

**Ryazantsev Nikolay** - Candidate of Technical Sciences, associate professor of department of development of stratal deposits Industrial Institute "Donetsk National Technical University", (square Shibankova, 2, Pokrovsk, 85300, Ukraine).

E-mail: rpm.kaf@ukr.net