

УДК 620.16:536

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

**Назимко И. В.**

*(УкрНИИИ, г. Донецк, Украина)*

*Проведено порівняння результатів лабораторних випробувань зразків гірничої породи з результатами теоретичного опису термодинаміки масиву навколо діючої виїмкової ділянки.*

*Test results of samples rock has compared to the results of theoretical description thermodynamics of rock mass around an operating excavation area.*

Механические свойства горных пород играют ключевую роль в оценке устойчивости массива, прилегающего к выемочному участку. Широко распространено мнение о том, что упругие показатели горных пород в допредельном состоянии породы являются константами. Особенно это мнение устойчиво для песчанников, которые обладают высокой прочностью и хрупкостью. Лабораторные испытания образцов подобных пород по традиционной схеме, как правило, подтверждают эту точку зрения. Подчеркнем, что она настолько устоялась, что подвергнуть ее сомнению считается просто неуместным. Вместе с тем даже достаточно прочный песчаник, обладающий выраженными хрупкими свойствами, содержит микродефекты. Границы зоны контакта зерен даже при самом прочном цементе являются выраженными микродефектами, которые при определенной схеме нагружения могут проявиться в виде необратимых деформаций.

Теоретически, с точки зрения термодинамики необратимых процессов это вполне возможно, что описывается уравнением Гиббса для внутренней энергии тела (1).

$$dU = TdS - PdV + \sum \mu_i dC_i, \quad (1)$$

где  $T$  – температура,  $S$  – энтропия,  $P$  – давление,  $V$  – объем системы,  $\mu_i$  и  $C_i$  – химические потенциалы компонентов вещества системы и среды, с которой она обменивается этими веществами и массовая концентрация указанных веществ.

Можно с уверенностью предположить, что химические реакции между веществами в окрестности выемочного участка не влияют существенно на проявления горного давления. В связи с этим в дальнейшем будем рассматривать компоненты  $TdS$  и  $PdV$ , которые непосредственно связаны с горным давлением или его проявлениями. Даже с учетом анизотропии массива горных пород и многокомпонентности тензора напряжений, давление  $P$  можно считать как характерную интенсивную характеристику горного давления, например, в качестве  $P$  можно рассматривать шаровой тензор напряжений, действующих в горном массиве. Знак минус перед второй компонентой характеризует закономерную взаимосвязь между давлением и приращением объема любой термодинамической системы. Поскольку все физические процессы, связанные с перераспределением горного давления можно с допустимой точностью считать изотермическими, уменьшение давления приводит к приращению объема массива горных пород и наоборот.

Компонента  $TdS$  с учетом практического постоянства температуры определяется энтропией системы.

Если компонента  $PdV$  в чистом виде отражает обратимый процесс и является теоретической основой постоянства деформационных параметров породы до наступления предела ее прочности, то вторая компонента  $TdS$  определяет возможность протекания необратимых процессов при «упругом» деформировании породного образца. Физические предпосылки для протекания таких необратимых процессов имеются: это неоднородности и места контактов зерен песчаника. Для возникновения таких необратимых процессов необходимо лишь создать условия, которые при традиционной схеме испытаний не реализовывались.

Автору работ [1-3] удалось найти такие режимы испытаний, при которых прочный хрупкий песчаник показал изменение де-

формационных свойств практически в два раза. Такой режим испытаний удалось найти, используя элементарные возмущения или флуктуации, описываемые формулами (2 и 3).

$$\Delta\delta S = (1/T)\sum \Delta X_i \Delta J_i . \quad (2)$$

Величину  $\Delta\delta S$  при этом назвали избыточным производством энтропии, вызванным возмущением системы относительно стационарного неравновесного состояния.  $X_i$  и  $J_i$  представляют собой соответственно термодинамические силы и потоки. В данном случае в качестве термодинамических сил выступают напряжения в образце горной породы, а в качестве потоков – смещения в образце в процессе его испытаний.

Процесс релаксации энтропии после воздействия флуктуации описывается уравнением [4-7]:

$$S_j(t) - S_j(0) = \sum \{L_{jk} \exp(-t/\tau_k)\} . \quad (3)$$

В данном уравнении в качестве экстенсивного термодинамического параметра использована энтропия. Символом  $\tau_k$  обозначено время релаксации  $k$ -того процесса, которые оказывает влияние на  $j$ -й процесс. Символы  $S_j(t)$  и  $S_j(0)$  обозначают неравновесное и равновесное значение экстенсивного параметра, соответственно. Разница указанных значений представляет собой приращение энтропии или в пределе ее производство.  $L_{jk}$  – представляет собой коэффициент взаимности термодинамических сил и потоков.

Испытания песчаника, имеющего прочность на одноосное сжатие порядка 90 – 100 МПа, осуществлялось в установке трехосного сжатия с сервомеханизмом, позволяющим задавать любые режимы испытаний и реализовывать их во времени. Для чистоты эксперимента использовался изотропный песчаник, прочность и деформируемость которого перпендикулярно и параллельно напластованию была практически одинаковой, поскольку ее различия находились в пределах 5 %, то есть не превышали ошибку измерений. Диаметр образца составлял 44,4 мм, а его высота 88 мм, что полностью соответствует требованиям международного стандарта, в соответствии с которыми высота образца должна быть не менее полуторной величины его диаметра.

До и после экспериментов из породных образцов изготавливались шлифы, которые подвергались микроскопическому исследованию микроструктуры песчаника и возможного выявления ее эволюции в результате трехосных испытаний.

На испытываемые образцы были наклеены тензодатчики из высококачественного материала (константановой фольги, заламинированной в полиамидную пленку). Образцы оборачивались медной фольгой толщиной 0,127 мм. В процессе испытаний образец нагружали осевым усилием и боковым давлением, создаваемым в камере трехосного сжатия. Осевые и радиальные компоненты деформаций ( $\varepsilon_{11}$  и  $\varepsilon_{\theta\theta}$ ) и напряжений ( $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{\theta\theta}$ ) измерялись тензометрами и манометрами с последующим преобразованием в электрические сигналы и их усилением.

Перед основными испытаниями образцы подвергались специальной тренировке путем гидростатического обжатия. Это делалось для устранения возможного влияния дефектов и проверки анизотропности образца. Обработка результатов испытаний образцов на их гидростатическое обжатие подтвердила, что образцы практически изотропны, и кроме того показала, что образцы обладают идеально линейной обратимой сжимаемостью. В процессе циклической нагрузки–разгрузки петли гистерезиса на диаграмме «напряжения – деформации» не образовывались. Другими словами при гидростатическом обжатии образцы песчаника действительно демонстрировали линейные упругие свойства и при этом деформировались обратимо, а их внутренняя энергия менялась только благодаря компоненте  $PdV$  (см. формулу 1).

Таким образом, были обеспечены простейшие свойства испытываемой породы: изотропность и линейная упругость, а значит и условия постоянства деформационных ее характеристик и независимость их от уровня напряжений. При этом в наличии были все условия, подтверждающие традиционные признаки постоянства деформационных свойств прочной изотропной хрупкой породы.

Основные испытания образцов песчаника проводились согласно специальному режиму. Во-первых, нагружение образца осуществлялось в пределах упругости, а точнее в пределах предела прочности на одноосное сжатие. При прочности испытываемо-

го песчаника на одноосное сжатие не менее 90 МПа активная осевая компонента напряжений не превышала 50 МПа. Если учесть, что даже при небольшом боковом обжатии прочность породы возрастает в несколько раз, можно сделать вывод о том, что испытания образцов проводились в пределах упругости с большим запасом.

Во-вторых, образцы, как уже указывалось, тренировались гидростатическим обжатием перед проведением основных испытаний. На рис. 1 показан график изменения осевой и боковой компонент напряжений, создаваемых в установке трехосного сжатия.

На графике видно, что в начале испытаний осуществлялось дважды равномерное увеличение осевой и радиальной компоненты напряжений до 40 МПа и снижение до 5 МПа. Как уже упоминалось, остаточных деформаций образцов при этом не было зафиксировано, что свидетельствует о чисто упругом характере деформаций.

В-третьих, в процессе дальнейших испытаний уровень нагрузки увеличивался несколькими ступенями, причем на каждом уровне осуществлялись возмущения образца путем вариации (флуктуаций) осевой и радиальной компоненты на 5-10 МПа. При этом даже на первой ступени нагружения, когда уровень напряжений в образце был минимален, амплитуда флуктуаций или возмущений образца была меньше уровня напряжений в два раза. На последней ступени амплитуда возмущений составляла всего 25 % от уровня действующих напряжений. Если учесть, что прочность образцов была не менее 90 МПа, то следует сделать вывод о том, что амплитуда возмущений не превышала 12 % от предела прочности. Следовательно, возмущения, прикладываемые к образцу, соответствовали понятию «флуктуации», поскольку они несущественно отклоняли напряженное состояние от текущей ступени нагружения, на которой образец успевал приходиться в равновесное состояние.

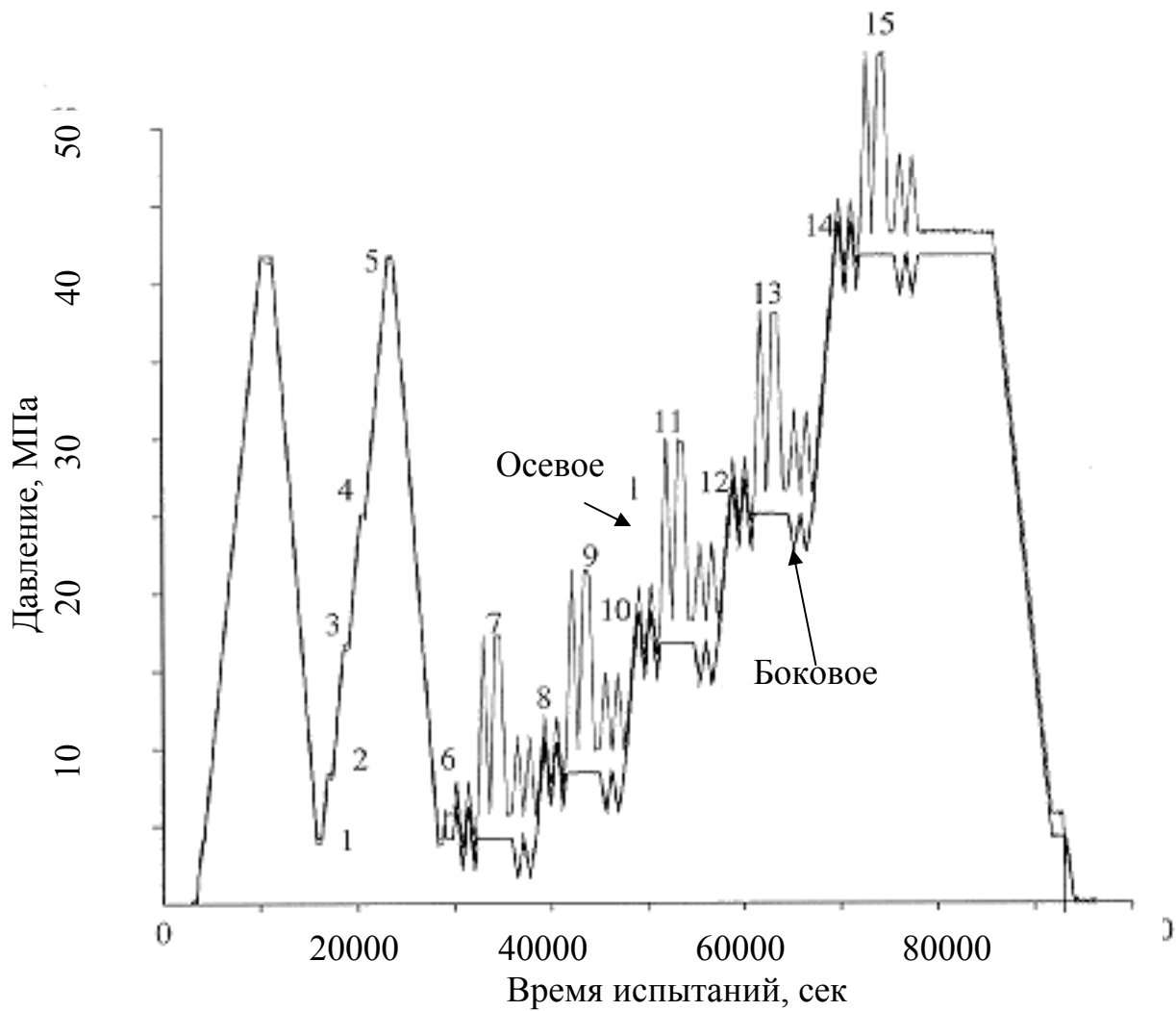


Рис. 1. Режим изменения осевого и бокового давления пари испытании образца горной породы. Цифрами обозначены этапы испытаний

В процессе испытания образцов рассчитывались нормальные  $\sigma$ , средние нормальные  $\sigma$  и касательные  $\tau$  напряжения, а также соответствующие им объемные  $\kappa$  и касательные  $\gamma$  деформации по формулам

$$\begin{aligned}
 \sigma &= (\sigma_{11} + 2\sigma_{\theta\theta})/3 \\
 \tau &= (\sigma_{11} - \sigma_{\theta\theta})/2 \\
 \kappa &= \varepsilon_{11} + 2\varepsilon_{\theta\theta} \\
 \gamma &= \varepsilon_{11} - \varepsilon_{\theta\theta}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Модули объемных и касательных деформаций определялись на каждой ступени нагружения по зависимостям

$$K = \partial\sigma/\partial\kappa; \quad G = \partial\tau/\partial\gamma$$

При этом в качестве приращений объемных и касательных деформаций принимались величины соответствующих деформаций, которые генерировались элементарными возмущениями. По существу модули деформации определялись наиболее точным образом как тангенс угла наклона касательных к графикам деформирования. Кроме того, благодаря сервомеханизму и возможности управления соотношением осевой и радиальной компонент напряжений и деформаций, различали несколько типов модулей.

Традиционно модуль упругости испытывают в одноосном напряженном состоянии. Поэтому величину модуля при одноосном нагружении определяли по зависимости  $K_{us} = \partial\sigma_{11}/\partial\varepsilon_{11}$  при  $\Delta\sigma_{\theta\theta}=0$ , где  $\Delta\sigma_{\theta\theta}$  означает возмущение радиального напряжения.

Модуль, определенный при отсутствии радиальных деформаций определялся по зависимости  $Y_{u\varepsilon} \equiv \partial\sigma_{11}/\partial\varepsilon_{11}$  при  $\Delta\varepsilon_{\theta\theta}=0$ . Разумеется, что отсутствие возмущений радиальных деформаций образца теперь поддерживалось с помощью сервомеханизма путем регулирования радиальных возмущений напряжения. Аналогично определялась величина коэффициента боковых деформаций  $D_{us} \equiv -\partial\varepsilon_{\theta\theta}/\partial\varepsilon_{11}$  при  $\Delta\sigma_{\theta\theta}=0$ .

Для повышения достоверности результатов испытаний модули деформации измеряли динамическими методами путем пропускания ультразвуковых колебаний через испытуемый образец. Таким образом, все меры предосторожности, обеспечения точности измерений, а также однородности породных образцов были предприняты, чтобы гарантировать достоверность выводов исследований. Это сделано для того, чтобы иметь веские основания для опровержения установившегося мнения о постоянстве деформационных характеристик горных пород в допредельной области нагружения.

На рис. 2 приведенные графики изменения соответствующих модулей и коэффициента поперечных деформаций при увеличении всестороннего сжатия образцов.

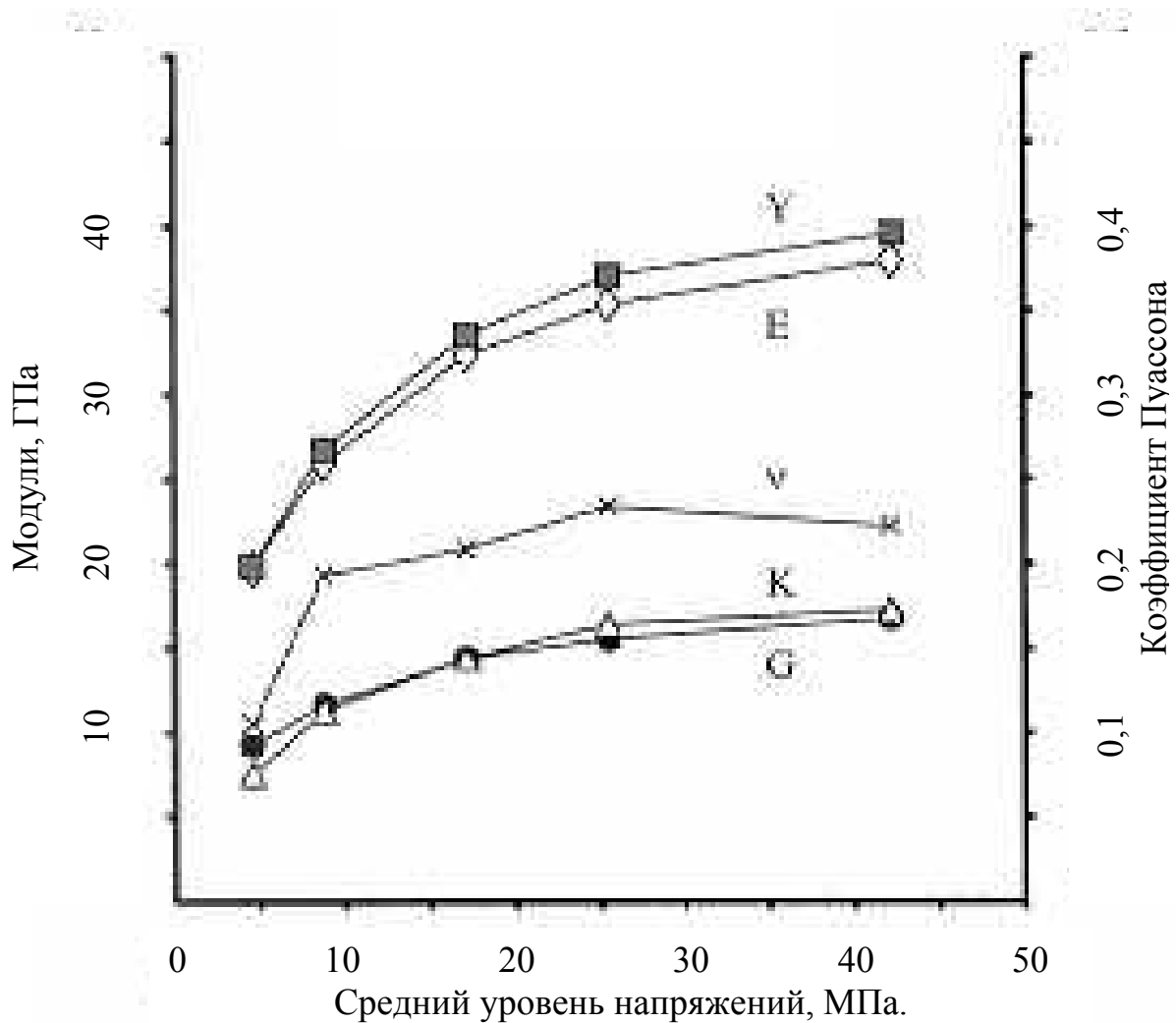


Рис. 2. Результаты обработки данных испытаний

Оказалось, что благодаря специальному режиму нагружения образцов удалось получить разные величины деформационных показателей породы в зависимости от уровня нормальных напряжений. При росте шарового девиатора нормальных напряжений от 5 до 45 МПа модуль деформации  $Y$ , определенный в условиях отсутствия радиальных деформаций образца изменился в пределах 20-39 МПа. Модуль упругости (модуль Юнга), определенный



при отсутствии радиальных возмущений напряженного состояния  $E$  нарастал от 20 до 36 МПа. Модуль объемной деформации  $K$  увеличился от 7 до 15 МПа, а модуль сдвига  $G$  от 9 до 14 МПа. Коэффициент Пуассона  $\nu$  при этом изменился в пределах 0,1 – 0,24.

Таким образом, деформационные характеристики прочного хрупкого образца породы, деформируемого при уровне нагрузок, не превышающих 60 % от предела прочности на одноосное сжатие, могут изменяться практически в два раза в зависимости от режима нагружения. Автор публикации не дает теоретического обоснования полученным результатам, однако полагает, что использование режима элементарных возмущений позволило проявиться скрытым дефектам в образцах песчаника. Важно, что выполненные исследования имеют прямое влияние на практику добычи горючих ископаемых.

Так, при добыче угля или нефти напряженное состояние в окрестности выемочного участка или забоя нефтяной скважины существенно отличается от одноосного, и более того, при выполнении элементарных процессов добычи происходит многократное возмущение напряжений. Часто амплитуда этих возмущений не превышает десятка процентов от предела прочности вмещающих пород. Примером таких возмущений при выполнении операций в очистном забое являются единичные процессы добычи угля и разгрузка одной секции механизированной крепи, а также подвигание очистного забоя на длину заходки. Именно такие процессы незначительно возмущают напряженное состояние массива в окрестности действующего очистного забоя.

При этом такие возмущения часто носят знакопеременный характер, то есть такой характер, который моделировался при испытании песчаника. Характерно, что указанные элементарные возмущения являются первопричиной развития масштабных аварий и как следствие потери устойчивости работы выемочного участка.

Очевидно, что характер перераспределения напряжений при действии элементарных возмущений определяется не средним модулем или усредненной величиной коэффициента Пуассона. Наоборот, на каждом элементарном пути нагружения массива в окрестности выемочного участка изменение напряженного со-

стояния регулируется как раз величиной деформационных характеристик пород, которые отвечают уровню нормальных и касательных напряжений, действующих в момент возмущения. Это наглядно показывают графики на рис. 2. Игнорирование зависимости деформационных параметров пород от уровня нормальных и касательных напряжений приводит к существенной погрешности расчета действующих напряжений. Эта погрешность, как показывает эксперимент, может достигать 100 %, поскольку величины деформационных показателей изменяются практически в два раза в диапазоне напряжений, чаще всего характеризующих состояние окружающих выемочный участок пород на глубинах 500-1000 м.

Авторы публикаций [2, 3] обратили внимание на то, что изменение деформационных показателей испытываемой породы зависят как от возмущений нормальных, так и касательных напряжений. Благодаря этому оказалось возможным выделить вклад по возмущениям обеих компонент в общее изменение величины деформационных показателей согласно следующим формулам:

$$\begin{aligned}\Delta\kappa &= \Delta\sigma/K_{\sigma} + \Delta\tau \zeta(\sigma,\tau) \\ \Delta\gamma &= \Delta\tau/G_{\tau} + \Delta\sigma \psi(\sigma,\tau)\end{aligned}\quad (3)$$

При этом компонента  $\zeta$  отвечает за изменение деформационного показателя от возмущения касательных напряжений, а член  $\psi$  от возмущения нормальных. Важно, что эти компоненты дают возможность одновременно учесть кооперативный эффект возмущений различной природы. Сравнивая эти формулы с зависимостью (2), можно заключить, что вторые множители являются по существу произведением термодинамических сил на соответствующие феноменологические коэффициенты, определяемые в формуле (3) через символы  $L$ . В качестве термодинамических сил в данном случае выступают возмущения нормальной и касательной компоненты напряжений. В качестве термодинамических потоков выступают реальные микротоки необратимых сдвижений берегов контактов между зернами, которые отражают процессы диссипации энергии горного давления под действием указанных возмущений.

В публикациях [2, 3] установлены эмпирические коэффициенты, зависимости  $\zeta$  и  $\psi$  от нормальных и касательных напряжений. Используя эти зависимости, были подсчитаны величины производства энтропии внутри горной породы за счет внутренних процессов диссипации энергии горного давления на дефектах типа контактов зерен и микропорах. При этом вычисления производства энтропии выполнены из расчета единичного возмущения, а именно при флуктуации компонент напряжений равной 1 МПа. Это весьма удобно, поскольку характеризует изменения состояния системы, обусловленные единичными возмущениями или флуктуациями. На рис. 3 показан график изменения производства энтропии с ростом величины объемного сжатия породы и уровне касательных напряжений 1 МПа (не путать с такой же величиной флуктуации).

Анализ графиков свидетельствует о том, что наиболее чувствителен к увеличению всестороннего сжатия коэффициент, который отражает влияние флуктуаций касательных напряжений. Так затухание производства энтропии от единичного возмущения касательных и нормальных напряжений наблюдается уже при 20 МПа. При этом производство энтропии падает в сотни раз. Доля производства энтропии под влиянием возмущений нормальной компоненты напряжений также уменьшается с увеличением всестороннего сжатия, однако она не столь чувствительна к росту напряжений. Так, при увеличении всестороннего сжатия от 0 до 50 МПа производство энтропии, обусловленное флуктуациями нормальных напряжений, снижается только в 8 раз. Аналогичная зависимость в качественном плане получена и при уровне касательных напряжений 10 МПа (рис. 4). Однако следует отметить, что величина касательных напряжений сильно влияет на уровень производства энтропии. Так, при росте уровня касательных напряжений всего в 10 раз, порядок величины производства энтропии (а значит и интенсивности диссипации энергии горного давления) возрос примерно в 100-500 раз.

При синхронном увеличении уровня нормальных и касательных напряжений графики изменения производства энтропии имеют экстремум в диапазоне всестороннего сжатия 8-30 МПа.

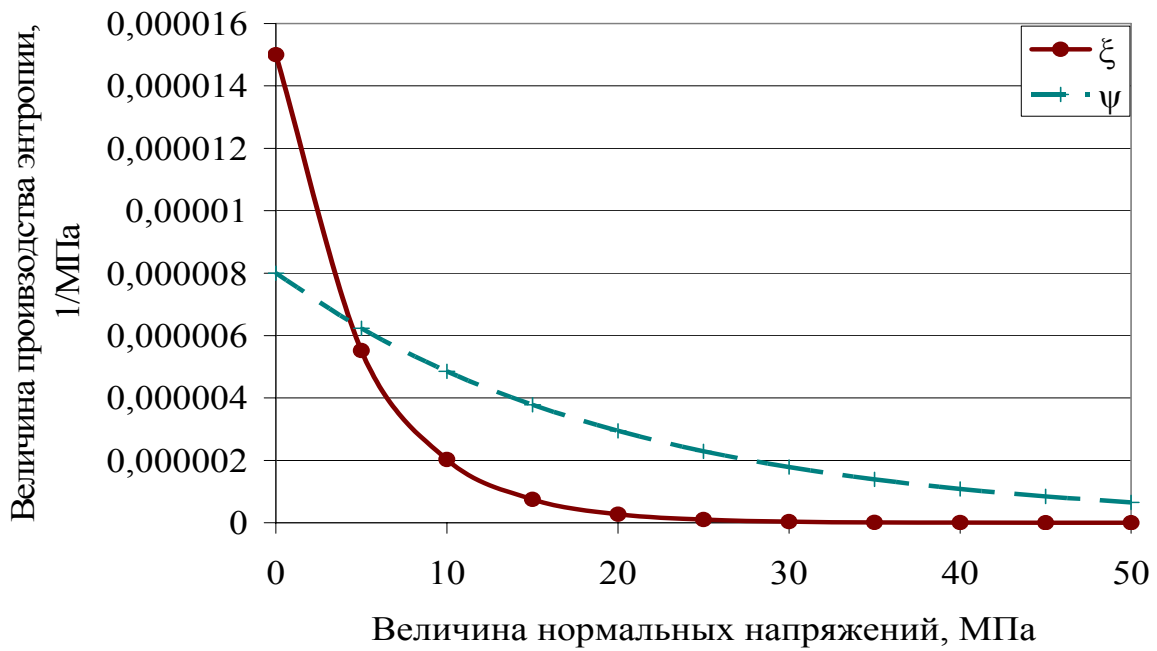


Рис. 3. Изменение производства энтропии при уровне касательных напряжений 1 МПа

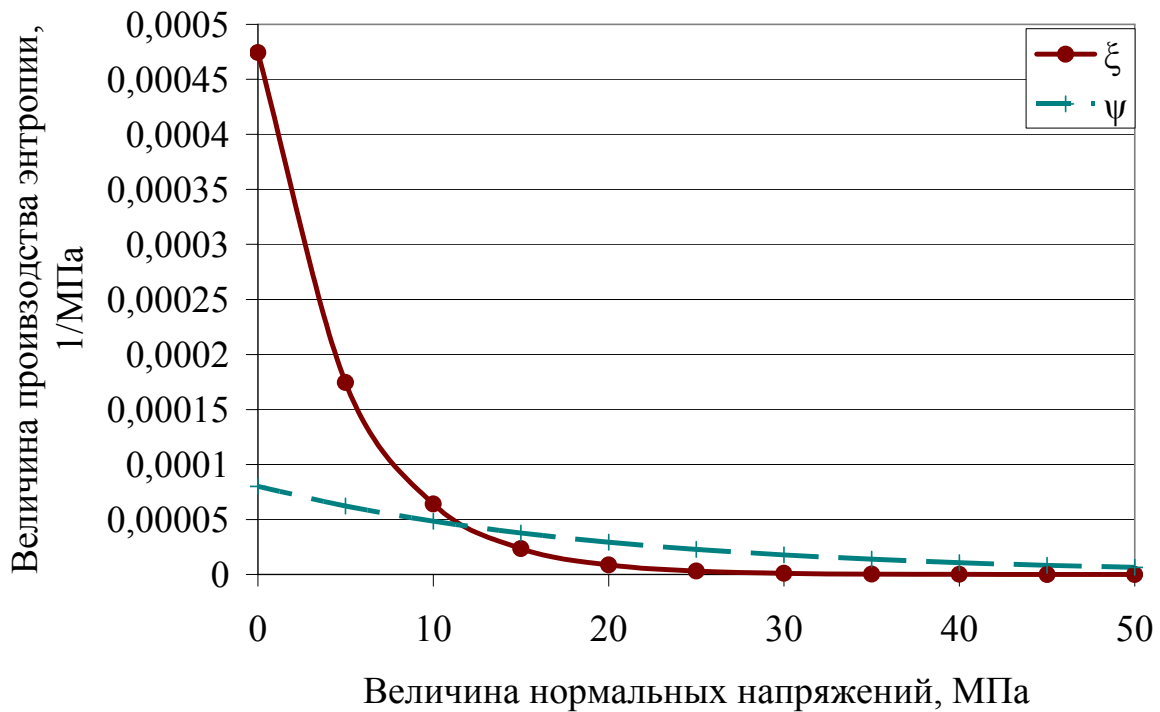


Рис. 4. Изменение производства энтропии при уровне касательных напряжений 10 МПа

(рис. 5). При более высоком уровне всестороннего сжатия темпы производства энтропии начинают падать.

Это хорошо согласуется с тем, что увеличение всестороннего сжатия значительно повышает пределы прочности горных пород, а также энергоемкость их деформирования за пределом прочности [8]. Можно сказать, что затухание производства энтропии обусловлено ростом энергоемкости всех необратимых процессов деформирования горной породы (не только разрушения, но и деформаций разрушенной породы за пределом прочности).

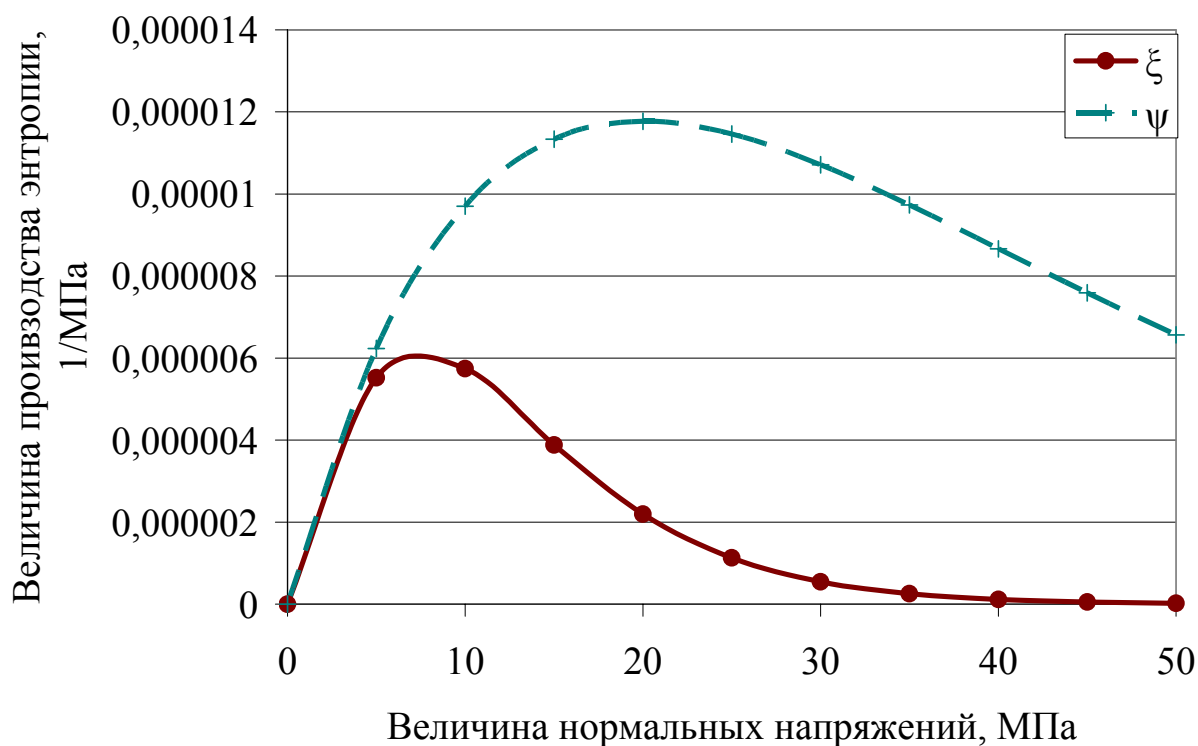


Рис. 5. Характер изменения производства энтропии при различном уровне касательных напряжений

Сравнивая установленную закономерность с графиками на рис. 1-2 можно сделать однозначный вывод об упрочнении образца породы при увеличении всестороннего сжатия и роста необратимых деформаций. Следовательно, необратимые и, в частности, пластические деформации образца отражают процесс его упрочнения с накоплением необратимых деформаций.

Подъем функции производства энтропии на начальном участке кривых имеет иную природу и обусловлен тем, что прирост производства энтропии от увеличения касательных деформаций не успевает подавляться низким пока уровнем напряжений всестороннего сжатия. В тот момент, когда эффекты роста производства и его подавления сравниваются по масштабам своего влияния, наступает максимум производства, после которого следует его спад. Выполненный в настоящей работе анализ показывает, что полученные экспериментально выводы о зависимости деформационных характеристик горной породы от уровня напряжений в допредельной области имеют теоретическое обоснование и не являются случайными.

Таким образом, сравнение результатов лабораторных испытаний образцов горной породы с результатами теоретического описания термодинамики горного массива вокруг действующего выемочного участка свидетельствует о хорошем согласовании практики и теории.

## **СПИСОК ССЫЛОК**

1. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. - М.: Наука, 1974.— 560 с.
2. Boitnott G. N. Experimental characterization of the nonlinear rheology of rock // *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* Vol. 34, No. 3 – 4, 1997.
3. Boitnott G. N. 1993, Fundamental observations concerning hysteresis in the deformation of intact and jointed rock with applications to nonlinear attenuation in the near source region, in *Proceedings of the Numerical Modeling for Underground Test Monitoring Symposium, Durango, Colorado, LA-UR-93-3839*, p. 121–134.
4. Бескаравайный Н.В., Ефремов И.А., Бунько Т.В., Кокотулин И.Е. Определение аэродинамической связи полевого (газосборного) и вентиляционного штреков 16 западной лавы шахты им. А.Ф.Засядько // *Геотехническая механика. Сборник научных трудов.*- Днепропетровск, ИГТМ НАНУ, 2002, вып.40. – С. 264-268.

5. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1973.- 324 с.
6. Гольденблат И.И., Бажанов В.Л., Копнов В.А. Энтропийный принцип в теории прочности полимерных материалов // Механика полимеров.- 1971, № 1. - С.113 - 121.
7. Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. - М.: Мир, 1964. – 452 с.
8. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – К.: Наукова думка. – 1989. – 192 с.