

**ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ
ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ
ПРИ КВАЗИУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ
В ГОРНЫХ ПОРОДАХ**

УДК 624.131+539.215

А. В. Михалюк, В. В. Захаров

Институт геофизики НАН Украины, 252054 Киев

Считается [1, 2], что при достаточно низких уровнях нагружения горные породы ведут себя как упругие твердые тела, способные диссипировать энергию деформационного процесса лишь при давлениях, приводящих к возникновению необратимой составляющей деформации, обусловленной их переходом в пластическое состояние или разрушением. Ниже показано, что при динамическом нагружении необратимое поглощение энергии наблюдается и при нагрузках значительно ниже предела упругости, что может быть связано как с проявлением вязкости, так и с изменением внутренней структуры породы.

На основе экспериментов с разнообразными интрузивными породами (гранитами, гранодиоритами, гранитогнейсами и др.) установлены общие закономерности изменения энергоемкости динамического деформационного процесса в зависимости от интенсивности и режима нагружения. Приводится сравнение количественных данных о диссипации энергии динамического нагружения в областях квазиупругого и упругопластического деформирования интрузивных пород.

Горные породы являются достаточно сложными деформируемыми средами. Эта сложность обусловлена особенностями их физического состояния (полиминеральностью, гетерогенностью, многофазностью, зернистостью, пористостью, структурной прочностью и т. п.), которые влияют на развитие деформационного процесса с самого начала нагружения и отражаются на общем виде диаграмм деформирования (поскольку горные породы в подавляющем большинстве случаев испытывают сжимающие нагрузки, изложенное ниже относится к такому виду динамических нагружений). В начале нагружения на соотношение между напряжениями и деформациями оказывает влияние частичное закрытие порового пространства (микродефектов) [3], вызывающее нелинейность диаграмм деформирования в области малых давлений. При достаточно больших нагрузках деформации минерального вещества породы существенно превышают деформации порового пространства, и поведение горной породы приближается к линейно-упругому, постепенное отклонение от которого по мере накопления микроразрушений или увеличения пластической составляющей деформации наблюдается при напряжениях, сравнимых с пределами текучести или прочности.

На рис. 1 представлены диаграммы одноосного динамического (а) и статического (б) сжатия $\sigma(\varepsilon)$, построенные на основании экспериментальных исследований пород различного происхождения, проведенных на приборно-измерительном комплексе [4]. Номера кривых 1–6 соответствуют порядковым номерам пород некоторых месторождений огнеупорного и нерудного сырья, а также природного газа Украины, приведенных в табл. 1, где даны краткие сведения об их физико-механических свойствах: плотности ρ , пористости n , скорости продольных упругих волн v_p , коэффициенте Пуассона ν , прочности при одноосном статическом сжатии σ_0 .

Эти диаграммы отражают результаты экспериментов, подобранных таким образом, чтобы исключить появление необратимой составляющей деформационного процесса, т. е.

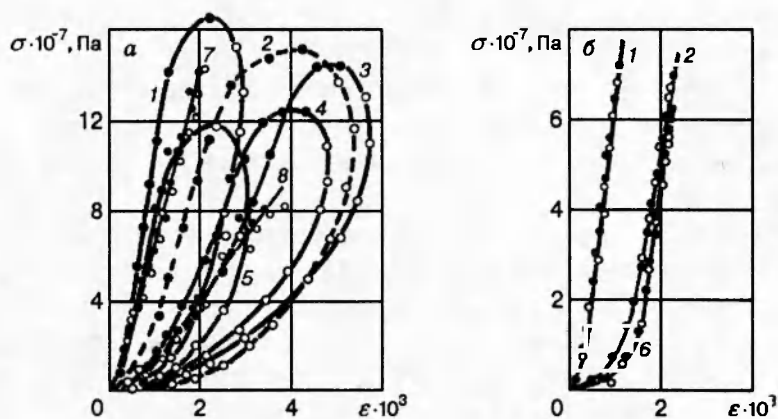


Рис. 1

чтобы состояние породы не выходило из области упругости. Однако, несмотря на упругое в целом поведение породы (кривая разгрузки возвращается в начало координат) при динамическом нагружении для всех типов пород, траектория нагружения не совпадает с траекторией разгрузки, причем

$$\int_0^{\epsilon_M} \sigma(\epsilon) d\epsilon + \int_{\epsilon_M}^0 \sigma(\epsilon) d\epsilon > 0, \tag{1}$$

что свидетельствует о поглощении энергии импульсного воздействия. Здесь σ и ϵ — напряжение и соответствующая ему относительная деформация породы; ϵ_M — максимальная относительная деформация породы, достигнутая в опыте.

Тот факт, что отмеченная особенность поведения горных пород свойственна только динамическим процессам, подтверждается сравнением кривых 1 и 2 на рис. 1, а с кривыми 1, 2 и 6 на рис. 1, б (черные точки — нагрузка, светлые — разгрузка), полученными на том же испытательном комплексе для тех же пород (см. табл. 1) при скорости нарастания давления $3 \cdot 10^4$ Па/с. Заметим, что при статических испытаниях едва заметное расхождение ветвей нагрузки и разгрузки для кривых 2 и 6 отмечено при падении напряжений ниже $4 \div 4,5$ МПа, что составляет $5,7 \div 7,8$ % амплитуды нагружения.

Вид диаграмм динамического деформирования горных пород не связан с погрешностями работы приборно-измерительного комплекса, достоверность работы которого была проверена тестовыми экспериментами по динамическому сжатию разнообразных модельных материалов — металлов (дюралюминия Д-16Т, литого свинца) и веретенного масла. Выбор этих материалов определен их гомогенностью, отсутствием ярко выраженной

Таблица 1

№ п/п	Порода	Месторождение	ρ , кг/м ³	n , %	v_n , км/с	ν	$\sigma_0 \cdot 10^{-5}$, Па
1	Кварцит розовый	Овручское	2650	0,4	5,89	0,10	1980
2	Гранит серо-зеленый	Малинское	2600	1,0	3,42	0,22	1570
3	Известняк серо-зеленый	Каменец-Подольское	2580	1,1	4,65	0,28	855
4	Алеврит	Западно-Крестищенское	2580	5,4	3,26	0,19	520
5	Песчаник глинистый	Западно-Крестищенское	2360	11,0	2,53	0,17	—
6	Гранитогнейс серый	Украинский щит	2610	0,8	4,29	0,21	1724

зернистости структуры, независимостью деформационных характеристик от временных режимов нагружения.

Некоторые результаты тестовых экспериментов приведены в [4]. На рис. 1, а показаны динамические диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ для дюралюминия Д-16Т и веретенного масла (кривые 7 и 8), полученные в процессе проведения тестовых экспериментов (динамическое нагружение масла осуществлялось по схеме $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p$, $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$; на кривых 7, 8 черные точки — нагрузка, светлые — разгрузка). Анализируя кривые 7, 8, легко заметить, что, во-первых, динамические значения модуля Юнга для дюралюминия и сжимаемость масла удовлетворительно согласуются с паспортными (статическими) характеристиками этих модельных материалов, т. е. влияние режима нагружения на деформационные свойства материалов при принятой методике проведения экспериментов неощутимо, а во-вторых, их диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ не имеют петлеобразного вида, характерного для горных пород.

Из рис. 1 и соотношения (1) можно сделать вывод, что при динамическом нагружении горные породы даже в упругой области являются активными диссипирующими средами, в силу этого отличия деформационные процессы в горной породе при нагрузках, не превышающих предел упругости, будем называть квазиупругими.

Следует заметить, что для горных пород, как и для других твердых тел, понятие предела упругости является достаточно условным, поскольку возможность определения необратимой деформации полностью зависит от разрешающей способности измерительной аппаратуры. Т. Карман еще в 1911 г. показал, что в горных породах «невозможно определить предел упругости как максимальное напряжение, при котором и ниже которого вся деформация полностью обратима» [5]. Однако под влиянием необходимости конкретизации пределов использования законов упругости для инженерных расчетов было введено понятие условной границы текучести, где возникает значительная остаточная деформация. В современных расчетах для конструкционных материалов такой критической деформацией считается 0,2 % (критерий Ходкинсона), хотя известны и другие предложения (например, критерий Вертгейма 0,05 %). Важно, что неопределенность понятия значительности остаточной деформации обусловила неопределенность понятия (а следовательно, и количественного определения) предела упругости. Поэтому при планировании и проведении описанных ниже экспериментов, обработке их результатов область квазиупругого поведения пород определялась из следующих соображений.

Известно, что возникновение необратимых деформаций в твердых телах связано с существованием структурных несовершенств кристаллов, благодаря которым реальная прочность тела и граница необратимости деформационного процесса существенно (на два порядка и более) меньше теоретического максимума упругой деформации [6]. Пока структурные несовершенства породы (кристалла) — дефекты Шотки и Френкеля, дислокации и т. п., присущие среде в естественном состоянии, находятся в состоянии относительного равновесия, деформация тела носит преимущественно упругий характер.

Движение дислокаций, возникающее под влиянием нагружения, необратимо и обуславливает появление необратимой составляющей деформации. Отсюда можно сделать вывод, что пределом упругости по нагружению является давление, при котором начинается движение структурных несовершенств кристаллов, а пределом упругости по деформациям — соответствующая деформация тела. Естественная дефектность горных пород настолько велика и разнообразна, что прямые количественные расчеты предела упругости практически невозможны, поэтому сделаем его относительную оценку.

Обычно момент старта дислокаций определяется соотношением Пайерлса — Набарро [6]:

$$\tau = \frac{2G}{q} \exp\left(-\frac{2\pi a}{qb}\right). \quad (2)$$

Таблица 2

Порода	Месторождение	$\dot{\sigma}$, ГПа/с	E , ГПа	σ_y , МПа
Гранит серо-зеленый	Малинское	278,8	132	348
		536,7	111	492
		350,0	124	460
Гранит порфиroidный	Корнинское	215,0	61	292
		198,6	106	308
Гранодиорит	Коростышевское	234,0	126	268
		425,0	139	480
		444,0	89	432
Гранит розовый	Емельяновское	355,0	140	448
		421,0	120	382
		234,0	121	310

Здесь τ — касательное напряжение; G — модуль сдвига; q — коэффициент, зависящий от типа дислокации; a и b — параметры кристаллической решетки.

Из (2) следует, что при движении дислокации имеет место ее эстафетная передача с периодическим ослаблением и восстановлением связей в кристаллической решетке. Поэтому напряжение τ значительно меньше теоретического в идеальной решетке, которое по Я. И. Френкелю равно $\tau_T = G/2\pi$. Для твердых тел с близким к линейному соотношением $\sigma(\epsilon)$, какими в подавляющем большинстве являются плотные прочные интрузивные породы (объект настоящего исследования), можно записать

$$\tau_T/\tau = \epsilon_T/\epsilon_y, \quad (3)$$

где ϵ_T — максимальная теоретическая упругая деформация; ϵ_y — упругая деформация, соответствующая реальному пределу упругости. Из (2) и (3) имеем

$$\epsilon_y = \frac{4\pi\epsilon_T}{q} \exp\left(-\frac{2\pi a}{qb}\right). \quad (4)$$

Расчеты по (4) показывают, что предел упругости по деформации ϵ_y зависит от сингонии породообразующих минералов и изменяется в следующих пределах: для кубической сингонии — $(4 \div 16) \cdot 10^{-2}$ %, триклинной — $(2,88 \div 10,7) \cdot 10^{-3}$ %, моноклинной — $(5,06 \div 18,9) \cdot 10^{-3}$ %, тетрагональной — $(2,93 \div 10,9) \cdot 10^{-3}$ %, ромбической — $(2,12 \div 7,89) \cdot 10^{-3}$ %, тригональной — $(2,07 \div 7,71) \cdot 10^{-7}$ %. Видно, что критическое значение ϵ_y для горных пород наиболее близко совпадает с критерием Вертгейма, предложенным еще в 1844 г., и на порядок меньше критерия Ходкинсона, общепринятого для конструкционных материалов. С учетом того, что необратимая деформация породы как полиминерального образования возникает вместе с необратимой деформацией наиболее слабого из породообразующих минералов, описанный подход для нахождения ϵ_y был использован для определения предела упругости некоторых интрузивных пород.

Результаты количественных расчетов приведены в табл. 2, где $\dot{\sigma}$ — скорость нагружения, E — модуль Юнга породы при соответствующей скорости нагружения, σ_y — предел упругости. Заметим, что поскольку взаимосвязь напряжений и деформаций в горных породах зависит от режима (скорости) нагружения, то и предел упругости проявляет подобную зависимость [4], которая для интрузивных пород Украинского щита показана на рис. 2 (всего было проведено 29 опытов с 11 разновидностями пород (см. табл. 2)), где точки соответствуют усредненным значениям для каждой разновидности.

На рис. 3 представлена зависимость удельной энергии деформационного процесса, приходящейся на единицу приложенной нагрузки, от амплитуды нагружения. Обращает на

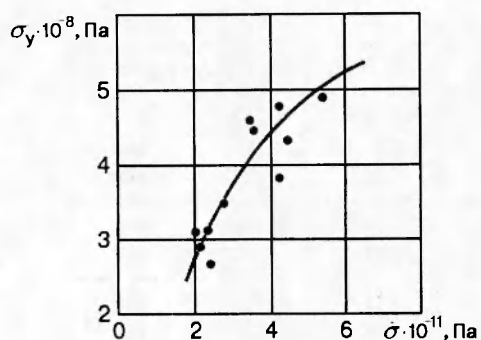


Рис. 2

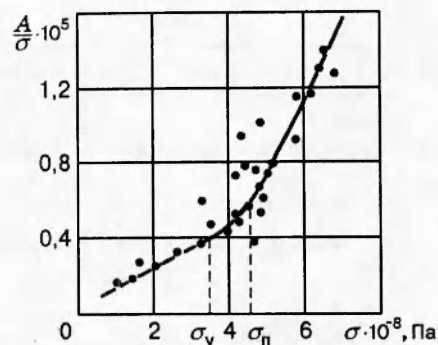


Рис. 3

себя внимание наличие двух четко выраженных ветвей с различными скоростями увеличения энергоемкости деформирования породы с ростом амплитуды динамического нагружения. Сравнивая напряжения области перегиба с данными о σ_y в табл. 2, легко прийти к выводу, что левая часть кривой соответствует квазиупругому состоянию породы, правая — упругопластическому. На рис. 3 можно выделить и переходную область от предела упругости σ_y до предела пластичности $\sigma_{п}$ при амплитудах нагружения от $3,5 \cdot 10^8$ до $4,6 \cdot 10^8$ Па. Нижняя граница этого диапазона достаточно близко совпадает с приведенным выше расчетным значением предела упругости.

Согласно рис. 3, в квазиупругой области зависимость энергоемкости деформационного процесса от интенсивности нагружения для интрузивных пород имеет параболический вид:

$$A = 1,09 \cdot 10^{-14} \sigma^2, \quad \text{Дж/м}^3. \quad (5)$$

Заметим, что общий вид зависимости (5) свидетельствует о линейном поведении интрузивных пород в квазиупругой области и подтверждает возможность использования соотношения (3) для количественных расчетов.

Можно предложить несколько механизмов диссипации энергии динамического нагружения (не вызывающего появления остаточных деформаций), удовлетворительно объясняющих внешний вид представленных на рис. 1, а диаграмм деформирования горных пород. В [7, 8] показано, что с позиций механики сплошной среды несовпадение ветвей нагружения и разгрузки при нагрузках, не превышающих предел упругости породы, может быть следствием теплового рассеяния энергии импульсного воздействия за счет вязких свойств деформируемой среды; причем качественное и количественное различие этих ветвей определяется временной конфигурацией импульса давления $\sigma(t)$, коэффициентом динамической вязкости, статическим и динамическим модулями упругости среды.

Представление о горной породе как об упруговязком теле в области квазиупругого нагружения удовлетворительно объясняет ряд экспериментально наблюдаемых фактов. Во-первых, как видно из рис. 1, а, при динамических нагружениях имеет место отставание по фазе амплитудных значений деформаций от напряжений (на диаграммах $\sigma(\varepsilon)$ это отражается в некотором увеличении деформаций при снижении действующих напряжений). Во-вторых, в [8] теоретически показано, что качественно подобные кривые $\sigma(\varepsilon)$ для сред с вязкостью должны иметь место при нагружении среды колоколообразным импульсом давления, что также подтверждается осциллографическими записями динамических процессов: отношение времен нарастания и спада давления в импульсе составляло $0,46 \div 0,58$ при среднем значении 0,508. В-третьих, исходя из модели линейной упруговязкой среды [7] с учетом зависимости коэффициента динамической вязкости от времени нагружения

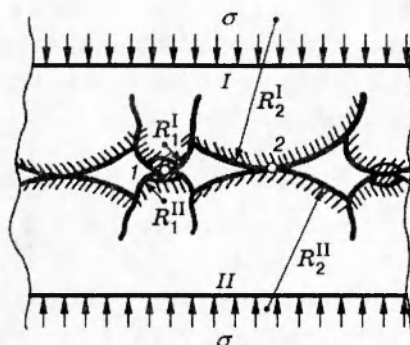


Рис. 4

[4], легко показать, что при статических нагрузках ($t \rightarrow \infty$) такая среда деформируется линейно-упруго, что подтверждается диаграммами на рис. 1, б.

В то же время в средах с вязкостью деформационные процессы в течение некоторого времени должны иметь место и после полной разгрузки среды по напряжениям. Это экспериментально наблюдалось в сжимаемых грунтах [9, 10]. Однако, как показали осциллограммы описанных выше экспериментов, продолжительность сигналов $\sigma(t)$ и $\varepsilon(t)$ в прочных горных породах практически совпадает (по крайней мере, с точностью следующих значений напряжений, деформаций и времени соответственно: $(2,0 \div 2,9) \cdot 10^5$ Па, $(0,4 \div 1,0) \cdot 10^{-5}$ и $(0,6 \div 0,8) \cdot 10^{-4}$ мс). Кроме того, только вязкостным механизмом диссипации энергии нельзя объяснить изменение физического состояния пород в результате упругого динамического нагружения, в частности снижение скорости распространения продольных упругих волн [11], увеличение фильтрационной проницаемости [12] и массообменных свойств [13]. Удовлетворительное объяснение этим эффектам можно дать с позиций механики зернистых сред, представляя горную породу как структурно-неоднородное деформируемое тело.

Рассмотрим деформацию пористой горной породы (рис. 4), сложенной минеральными зернами различных размеров, находящимися между собой в контактом взаимодействии. Выделим ее характерный элемент, состоящий из однотипных минеральных образований I и II, обладающих одинаковыми механическими свойствами. У этого элемента расстояние между точками контакта 1 и 2 можно рассматривать как характерный размер поры (микротрещины). При статических нагружениях деформационный процесс развивается за счет межкристаллического (межзеренного) смещения [14] с относительно равномерным распределением нагрузки по минеральному веществу породы. Поскольку уровень нагружения не превышает предел упругости, при разгрузке деформационный процесс развивается по тому же пути, восстанавливая первоначальный объем тела.

При кратковременных динамических нагружениях смещение зерен по поверхностям скольжения не успевает развиваться, и вся нагрузка воспринимается контактами между минеральными зернами. Эта особенность поведения зернистой среды подтверждается преимущественным разрушением кристаллов при достаточно высоких уровнях нагружения [14]. Качественную сторону последствий такого взаимодействия при нагрузках, не вызывающих остаточных деформаций среды, можно проанализировать на основе следующих рассуждений.

Представим, что характерный элемент зернистой среды (рис. 4) подвержен динамическому нагружению. Принимая во внимание, что размер зерна, как правило, много меньше длины волны, возбуждаемой в образце горной породы при лабораторных испытаниях [4] или при промышленных типах динамического нагружения (взрывах, ударах, электроразрядах и т. п.), будем считать, что взаимодействие между отдельными минеральными ча-

стицами носит квазистатический характер, и для оценки контактных напряжений между зернами допустимо воспользоваться известной задачей Герца [15]. Не нарушая качественной картины анализа, положим, что радиусы кривизны контактирующих поверхностей в точках контакта связаны следующим образом:

$$R_1^I = R_1^{II} = R_1 < R_2^I = R_2^{II} = R_2, \quad R_2 = \alpha R_1.$$

Здесь индексы 1 и 2 относятся к точкам контакта 1 и 2, I и II — к минеральным образованиям I и II. При такой схематизации взаимодействия зерен соотношение между максимальными в точках контакта 1 и 2 давлениями составит $\alpha^{2/3}$. Так, если радиус кривизны зерен в точке 2 вдвое больше, чем в точке 1, контактное давление в последней примерно в 1,6 раза больше, чем в точке 2, и т. д. Пусть интенсивность нагружения σ (рис. 4) такова, что контактное давление между достаточно крупными контактирующими зернами при некотором фиксированном уровне нагружения не превышает предел упругости минерального вещества, но приближается к нему. Тогда, основываясь на вышеизложенном и принимая во внимание разнотекстурность пород, можно утверждать, что в ней всегда найдутся такие контакты между зернами (кристаллами), на которых контактные напряжения достигают не только предела упругости, но и предела прочности. Вследствие этого имеется местное разрушение минерального вещества, на которое расходуется соответствующее количество энергии динамического нагружения.

При снятии нагрузки расстояние между зернами восстанавливается до первоначального под влиянием упругой разгрузки в точках с малой кривизной, где давления не превышали σ_y . Деформация породы в целом остается упругой, контакт минерального вещества в точках с большой кривизной контактной поверхности исчезает, так как разрушенный и переплотненный [14] материал частично заполняет естественные поровые каналы (рис. 4), возникает новый поровый канал, вызывающий изменение некоторых свойств породы (например, фильтрационной проницаемости). Понятно, что в первую очередь местному разрушению подвергаются те минеральные зерна породы, у которых больше кривизна контактной поверхности.

Такой механизм диссипации энергии динамического нагружения удовлетворительно согласуется с микроструктурными и микротекстурными изменениями в породах [14, 15], а также позволяет объяснить некоторые особенности изменения их физических свойств, проверенные и используемые в технологиях интенсификации скважинных геотехнологических процессов [11–13, 16]. Однако он не может обосновать упоминавшиеся выше особенности диаграмм динамического деформирования пород, в частности увеличение деформаций за фронтом максимальных напряжений. По-видимому, в реальных условиях имеют место и дополняют друг друга оба рассмотренных механизма диссипации энергии. Это дает основание утверждать, что особенности механического поведения горной породы как твердого деформируемого тела при динамическом нагружении не могут быть обоснованы только с позиций механики сплошной среды: для их объяснения, а тем более для теоретического обоснования необходим единый подход с позиции механики сплошных и дискретных (зернистых, блочных и т. п.) сред.

В упругопластической области нагружения энергия деформационного процесса также изменяется с ростом интенсивности нагружения по параболическому закону. Вторая ветвь кривой на рис. 3 удовлетворительно аппроксимируется зависимостью

$$A = 3,94 \cdot 10^{-14} \sigma^2 - 1,198 \cdot 10^{-5} \sigma, \quad \text{Дж/м}^3. \quad (6)$$

Сравнивая (5) и (6), легко убедиться, что в упругопластической области, т. е. с появлением необратимых деформаций, скорость увеличения удельной энергоемкости деформационного процесса примерно в 3,6 раза больше, чем в квазиупругой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Пластичность горных пород. М.: Недра, 1979.
2. Беликов Б. П., Александров К. С., Рыжова Т. В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М.: Наука, 1970.
3. Оберт Л. Хрупкое разрушение горных пород // Разрушение. М.: Мир, 1976. Т. 7, ч. 1. С. 59–128.
4. Михалюк А. В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. Киев: Наук. думка, 1980.
5. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. II. Конечные деформации. М.: Наука, 1984.
6. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982.
7. Ляхов Г. М., Полякова Н. И. Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. М.: Недра, 1967.
8. Ляхов Г. М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука, 1982.
9. Действие крупномасштабных взрывов в массиве горных пород. Ч. I / Под ред. А. Н. Щербаня. Киев: Наук. думка, 1974.
10. Ставницер Р. Л. Деформация оснований сооружений от ударных нагрузок. М.: Стройиздат, 1969.
11. Михалюк А. В., Мухин Е. А. Акустический контроль дилатансии горных пород при допредельных динамических нагрузках // Изв. вузов. Горн. журн. 1993. № 4. С. 8–12.
12. Кузнецов О. Л., Ефимова С. А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1983.
13. А. с. 613086 СССР. Способ подземного выщелачивания полезных ископаемых / А. В. Абрамов, Н. В. Демин, Л. С. Хейфец // Открытия. Изобретения. 1978. № 24.
14. Лучицкий И. В., Громин В. И., Ушаков Г. Д. Влияние высоких давлений и температур на деформационные свойства гипербазитов // Физические свойства горных пород при высоких термодинамических параметрах. Киев: Наук. думка, 1971. С. 194–197.
15. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979.
16. Derlich S. Transformation du milieu dues a une explosion nucléaire souterraine // Peaceful Nuclear Explosions. Vienna: IAEA, 1970. P. 123–137.

*Поступила в редакцию 27/VII 1994 г.,
в окончательном варианте — 19/I 1996 г.*
