

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 622.235:658.382.3

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВАХ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ В ВОДНЫХ ОБОЛОЧКАХ С УЧЕТОМ ДИЛАТАНСИИ

В.С. Прокопенко, канд. техн. наук (ЗАО «Техновзрыв»)

В рамках пружнопластичної дилатансійної моделі розроблено методику моделювання динамічного деформування гірської породи під час вибухів свердловинних зарядів у водних оболочках. При цьому досліджено вплив швидкості дилатансії на процес руйнування гірської породи.

Вопросу повышения эффективности взрыва в твердых средах посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ, из которых следует, что одним из методов увеличения полезной работы взрыва является создание воздушного зазора вокруг заряда химического взрывчатого вещества (ВВ). Н.В. Мельников и Л.Н. Марченко, обнаружившие повышение эффективности взрыва зарядов специальной конструкции с воздушными зазорами [1], объясняли это явление тем, что воздушные зазоры уменьшают расход энергии взрыва на переизмельчение и перешагивание породы вблизи заряда и, следовательно, повышают долю полезной энергии. В.Н. Родионов [2] дал теоретическое обоснование этого явления, исходя из предположения о квазистатичности последней стадии камуфлетного взрыва. В.М. Кузнецов сделал попытку оценить оптимальную величину воздушного зазора в мягком грунте на основе модели пластического газа при предположении, что давление в конце расширения газовой полости может быть меньше статического [3]. В последующих многочисленных исследованиях, в частности в [4–9], основное внимание уделялось изучению влияния воздушных зазоров на результаты взрывов. При этом использовались упрощенные модельные представления сред, не дающие возможности адекватного описания процесса деформирования горной породы при взрыве заряда с воздушными или водными промежутками. Как известно [4, 10], влияние водного промежутка между зарядом ВВ и породой на эффективность взрыва больше, чем воздушного. Необходимо также учитывать, что происходящее при взрывах необратимое деформирование горной породы вызвано возникновением и ростом трещин и пор, взаимным перемещением минеральных зерен и развитием дислокаций внутри них [11–13]. Эти явления служат причиной дилатансионного изменения объема, которое необходимо принимать во внимание для более полного исследования динамических процессов в горных породах. При этом численное моделирование развития взрыва заряда ВВ с водной оболочкой вокруг него с использованием современных математических моделей горных пород

представляет теоретический интерес и непосредственную практическую ценность.

Пусть в горном массиве цилиндрический заряд ВВ расположен по оси скважины, заполненной водой. Принимается схема мгновенной волновой детонации, согласно которой весь заряд детонирует мгновенно и по всему его объему устанавливается одинаковое высокое давление p_n и одинаковая плотность ρ_n , равная начальной плотности ВВ. От контактного разрыва продукты детонации–вода по воде начинает распространяться ударная волна сжатия.

Рассматривается связанная задача для продуктов детонации (ПД), воды и горной породы, обусловленная связанностью полей термодинамических параметров в этих средах, изучаемых в рамках механики сплошной среды.

Уравнения движения для ПД и воды, представляющие собой законы сохранения массы, импульса и энергии, в переменных Лагранжа для взрыва цилиндрического заряда имеют следующий вид:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial p}{\partial r}, \quad \frac{\partial r}{\partial t} = u; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r\rho u)}{\partial r} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} - \frac{p}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

где ρ – плотность; u – массовая скорость; t – время; r – пространственная координата; p – среднее гидростатическое давление; E – внутренняя удельная энергия среды.

Пусть расширение ПД происходит по изэнтропическому уравнению состояния в форме двучлена [14–16]:

$$P = A\rho^n + B\rho^{\gamma+1}, \quad (4)$$

где A , n , B , γ – экспериментальные постоянные величины, характеризующие детонационные параметры ВВ.

Связь между давлением и плотностью воды в широком интервале значений давления описывается экспериментально полученным уравнением Тэста:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2}{\beta} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\beta - 1 \right], \quad (5)$$

где ρ_0 , c_0 – плотность воды и скорость звука в ней при атмосферном давлении; β – экспериментальная постоянная.

Движение горной породы происходит в соответствии с системой уравнений

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r p u)}{\partial r} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + p \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} - \bar{V} (S_r \dot{\epsilon}_r + S_\theta \dot{\epsilon}_\theta) = 0; \quad (8)$$

$$\sigma_i = S_i - p, \quad (i = r, \theta, z), \quad (9)$$

где $S_i, \sigma_i (i = r, \theta, z)$ – компоненты полного тензора и диватора тензора напряжений; $\bar{V} = V/V_0$; V, V_0 – текущий и начальный (при $p = p_0$) удельные объемы; r, θ, z – цилиндрические координаты. Для компонентов тензора скоростей деформации выполняются соотношения

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{u}{r}. \quad (10)$$

Пусть в зоне упругих деформаций горной породы выполняется закон Гука в конвективной форме:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} + u \frac{\partial \tau}{\partial r} = 2G \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right); \quad (11)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial r} = -K \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right), \quad (12)$$

где $\tau = \sigma_r - \sigma_\theta$ – дифференциальное напряжение; σ_r и σ_θ – соответственно нормальные и тангенциальные напряжения, G – модуль сдвига, K – коэффициент объемного сжатия.

Принимается также, что в породе происходят необратимые деформации при выполнении закона сухого трения в форме Треска:

$$|\sigma_r - \sigma_\theta| = \sigma_s, \quad (13)$$

где σ_s – предел прочности при одноосном сжатии. Эти пластические деформации соответствуют изменению объема системы трещин и пор горной породы и могут быть описаны неассоциативным законом течения, который для цилиндрической системы координат сводится к дилатансионному уравнению [11]. При пренебрежении упругим сдвигом это уравнение будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{K} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \Lambda \left| \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right|, \quad (14)$$

где Λ – скорость дилатансии, причем в случае $\Lambda > 0$ область среды, где выполняются условия (13)–(14), является зоной дилатансионного разрыхления; при $\Lambda = 0$ – зоной традиционной пластической несжимаемости; при $\Lambda < 0$ – зоной упрочнения среды.

Выражение для скорости дилатансии примем в виде, полученном при обработке экспериментальных данных [13]:

$$\Lambda = \begin{cases} \Lambda_0 \exp(-a_0 \operatorname{sign}(R) \sqrt{|R|}) & \text{при } R \geq b \text{ или } R < b \text{ и } \tau < \sigma_s, \\ \Lambda_1 \exp(-a_1 \operatorname{sign}(R) \sqrt{|R|}) & \text{при } R < b \text{ и } \tau \geq \sigma_s, \end{cases} \quad (15)$$

где $R = (p - \tau)/3$; a_0 – экспериментальная постоянная; $a_1 = a_0 + \ln(\Lambda_1 / \Lambda_0) \sqrt{b}$; Λ_0 , Λ_1 – значения скорости дилатансии при одноосном сжатии слева и справа от предела прочности. Экспериментальный параметр b близок к нулю. При $R \geq b$ скорость дилатансии не испытывает скачка при переходе через предел прочности.

Начальные условия задачи при $t = 0$ следующие:

$$u = 0, p = p_n, \rho = \rho_n \text{ при } 0 \leq r \leq r_0;$$

$$u = 0, p = \sigma_r = 0, \rho = \rho_0 \text{ при } r_0 < r \leq r_n;$$

$$u = 0, p = \sigma_r = 0, \rho = \rho_1 \text{ при } r > r_n,$$

где ρ_1 и ρ_0 – плотность горной породы и воды при $p = p_0$ (p_0 – атмосферное давление), r_0 – радиус заряда, r_n – радиус полости (скважины).

Граничными условиями являются:

1) условие непротекания: $u = 0$ при $r = 0$;

2) условие непрерывности нормальных радиальных напряжений σ_r и массовой скорости u на подвижных контактных разрывах ПД–вода и вода–горная порода.

Для аппроксимации исходной системы дифференциальных уравнений применялась конечно-разностная схема сквозного счета типа “крест” с искусственной вязкостью второго порядка точности по пространственной и временной координатам. Условием устойчивости разностной схемы служит условие типа Куранта [17].

В качестве примера рассматривается взрыв цилиндрического заряда диаметром 0,18 м в заполненной водой скважине диаметром 0,22 м в алевролите.

Детонационные характеристики ВВ:

$$\rho_n = 1250 \text{ кг/м}^3; \text{ удельная энергия взрыва } Q = 3024 \text{ кДж/кг}; \text{ скорость детонации } D = 5000 \text{ м/с}; p_n = 4,46 \cdot 10^9 \text{ Па}; A = 36,73 \text{ Па (кг/м}^3)^{-1/2}; B = 4,3 \cdot 10^1 \text{ Па (кг/м}^3)^{-2}; n = 2,6; \gamma = 1,25.$$

Физико – механические характеристики алевролита:

$\rho_f = 2400 \text{ кг/м}^3$; $K = 3,12 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $G = 2,33 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $\sigma_x = 5,3 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $\Lambda_1 = 1,35$;
 $a_0 = 0,1$; $a_1 = 0,07$; $b = 0,15$.

Начальные значения скорости дилатансии для алевролита [13]: $\Lambda_0 = 0,5$;
 $0,3$; $-1,17$.

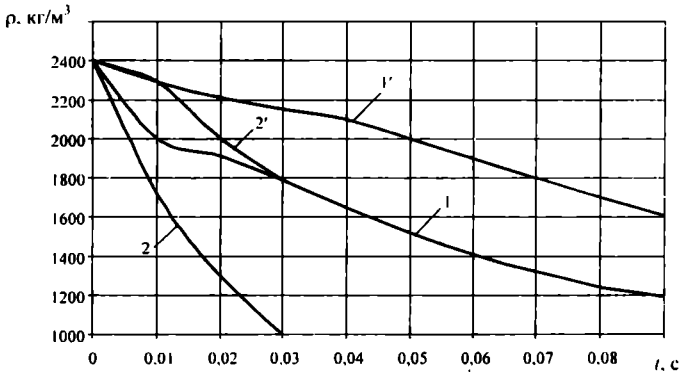
Константы для воды в уравнении Тэта были выбраны следующие:
 $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $c_0 = 1500 \text{ м/с}$; $\beta = 7$.

На рис. 1 представлены графические зависимости изменения плотности породы от времени: на границе полости (цифры без штрихов) и на расстоянии $2r_n$ (цифры со штрихами) (а), а также на расстоянии $13,7r_n$ (б). Кривые 1 и 1' соответствуют значению $\Lambda_0 = 0,5$, кривые 2 и 2' – $\Lambda_0 = 0,3$. Из сопоставления кривых видно, что с уменьшением Λ_0 происходит более интенсивное разуплотнение породы.

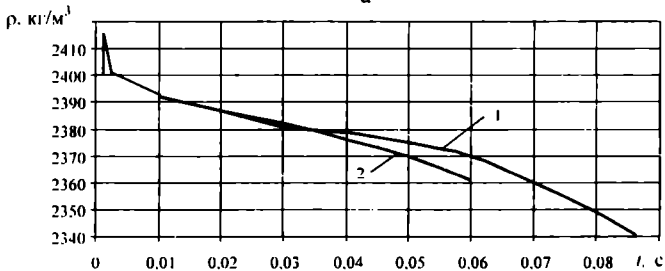
На рис. 2 изображено изменение во времени давления в алевролите на расстоянии $38r_n$ (соответствие кривых значениям скорости дилатансии то же, что на рис. 1, б). Видно, что в средней зоне значения максимального давления и второго пика давления увеличиваются с уменьшением Λ_0 .

В дальней зоне взрыва (на расстоянии $100r_n$) (рис. 3) максимумы давления и время их достижения практически одинаковы для различных значений скорости дилатансии. Наблюдается участок уплотнения породы, соответствующий приходу ударной волны в данную точку. Далее следует участок с близкими к нулю значениями давления, соответствующий растягивающим напряжениям. Последующие пики давления вызывают разрушение алевролита. При этом величина второго пика давления с уменьшением скорости дилатансии увеличивается приблизительно в 1,3 раза. Это приводит к тому, что с уменьшением скорости дилатансии происходит увеличение радиуса зоны разрушения алевролита примерно в 1,1 раза [10]. Этот эффект может быть использован при короткозамедленном или повторном взрывании. Хотя при первом взрывании среда в дальней зоне взрыва может быть не разрушена, однако за счет первоначального нагружения скорость дилатансии уменьшается по сравнению с первоначальной.

На рис. 4 представлены зависимости от времени среднего гидростатического давления (а) и плотности (б) в средней и дальней зонах взрыва при $\Lambda_0 = -1,17$: кривая 1 – для $41,7r_n$, кривая 2 – для $110r_n$. Из сопоставления кривых на рис. 3 и 4 видны существенные количественные и качественные различия напряженного состояния горной породы с положительными и отрицательными значениями скорости дилатансии. При $\Lambda_0 > 0$ имеется явно выраженный второй максимум давления, вызывающий дробление горной породы, так как вторая волна проходит по предварительно сжатому напряженному массиву. При $\Lambda_0 < 0$ второй пик давления не наблюдается, однако имеется участок отрицательного давления, соответствующий растяжению горной породы, за счет которого и происходит дробление последней.



а



б

Рис. 1. Зависимость изменения плотности породы от времени: а - на границе полости (1 - $\Lambda_0 = 0.5$; 2 - $\Lambda_0 = 0.3$) и на расстоянии $2r_{II}$ (1' - $\Lambda_0 = 0.5$; 2' - $\Lambda_0 = 0.3$); б - на расстоянии $1.37r_{II}$ (1 - $\Lambda_0 = 0.5$; 2 - $\Lambda_0 = 0.3$)

Следовательно, при положительных и отрицательных значениях скорости дилатансии механизм деформирования и разрушения горной породы различный. Из рис. 4, б следует, что в средней и дальней зоне взрыва происходит незначительное уплотнение с последующим небольшим разуплотнением горной породы. Свойства ее близки к свойствам упругой среды. В соответствии с этим ведет себя и скорость дилатансии (рис. 5). Наблюдается участок отрицательного ее значения, соответствующий уплотнению, и положительный - разуплотнению. При нулевом значении давления $\Lambda = 0$. Расчеты показывают, что величина скорости дилатансии на 110 радиусах заряда близка к нулю, что соответствует упругому поведению горной породы на таких расстояниях. На рис. 5 кривая 1 соответствует $\Lambda_0 = 0.5$; кривая 2 - $\Lambda_0 = -1.17$. Из рисунка следует, что с увеличением давления в области малых его значений Λ увеличивается, а в области больших значений давления - уменьшается.

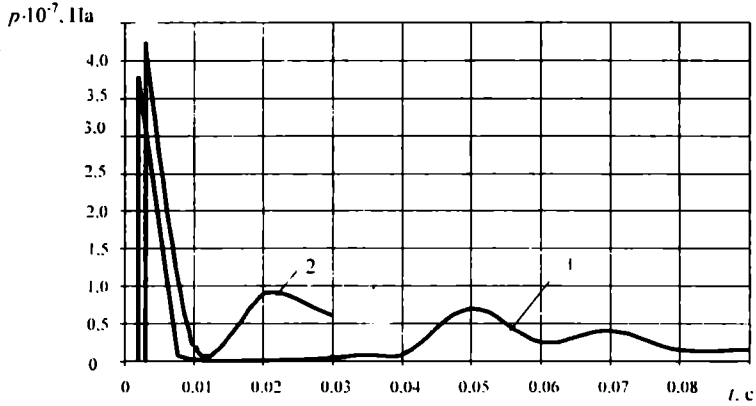


Рис. 2. Зависимость давления от времени на расстоянии $38 r_{II}$ в алевролите: 1 – $\Lambda_0 = 0,5$; 2 – $\Lambda_0 = 0,3$

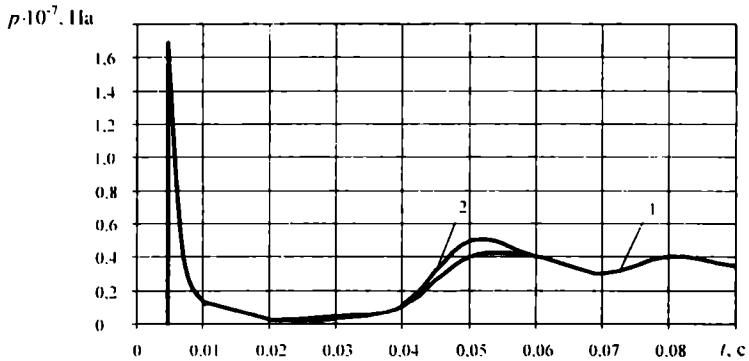
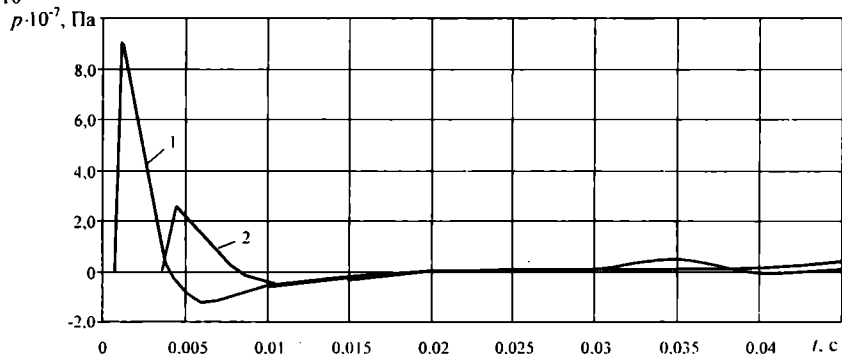
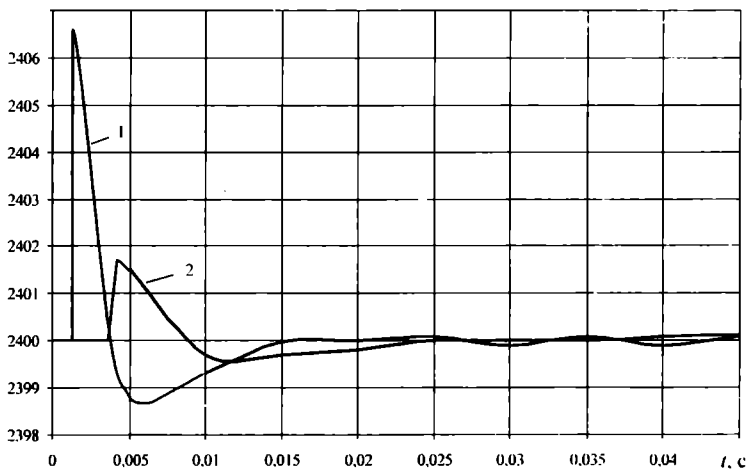


Рис. 3. Зависимость давления от времени на расстоянии $100 r_{II}$ в алевролите: 1 – $\Lambda_0 = 0,5$; 2 – $\Lambda_0 = 0,3$

10



а

 $\rho, \text{кг/м}^3$ 

б

Рис. 4. Зависимость от времени среднего гидростатического давления (а) и плотности породы (б) при $\Lambda_0 = -1,17$: 1 - $r = 41,7 r_n$; 2 - $r = 110 r_n$

Из результатов теоретических и экспериментальных исследований [10] следует, что наличие водного зазора между зарядом и стенкой скважины ведет к увеличению радиуса зоны дробления на 18–23 %. На рис. 6 представлена зависимость относительного радиуса зоны разрушения $R_p = R_p / r_0$ от времени при взрыве заряда с водной оболочкой (кривая 2) и при взрыве заряда без оболочки (кривая 1). Из рисунка видно, что в начале процесса разрушение более интенсивно происходит при взрыве заряда без оболочки, а с течением времени – при взрыве заряда с водной оболочкой. Это объясняется следующим

образом. Водная оболочка работает как демпфер. Она уменьшает максимальное давление в ближней зоне взрыва (рис. 7, а). Это, в свою очередь, ведет к увеличению скорости дилатансии (рис. 7, б). В то же время вода накапливает энергию, которая со временем передается в горную породу. Из расчетов следует, что импульс давления при наличии водной оболочки растягивается во времени, скорость дилатансии уменьшается, что влечет за собой увеличение максимальных давлений в средней и дальней зонах взрыва по сравнению с давлениями при взрыве без водной оболочки. Это приводит к увеличению радиуса зоны дробления при взрыве заряда с водной оболочкой в 1,21 раза. Из рис. 7, б видно также, что в ближней и средней зоне взрыва как при наличии водной оболочки, так и без нее дилатансионное разрушение среды происходит за счет сжимающих напряжений ($\Lambda < 0$), в дальней – за счет растягивающих напряжений ($\Lambda > 0$).

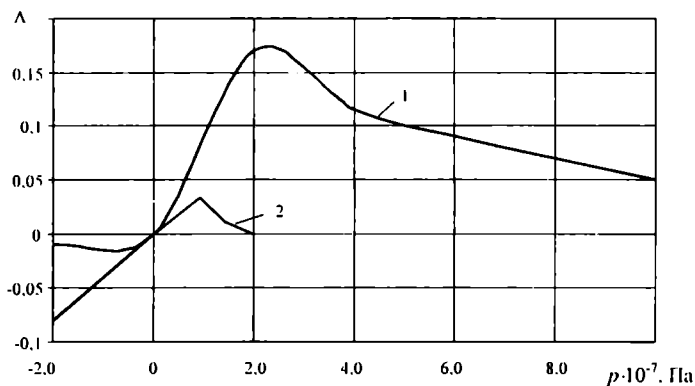


Рис. 5. Зависимость скорости дилатансии от давления: 1 – $\Lambda_0 = 0.5$; 2 – $\Lambda_0 = -1.17$

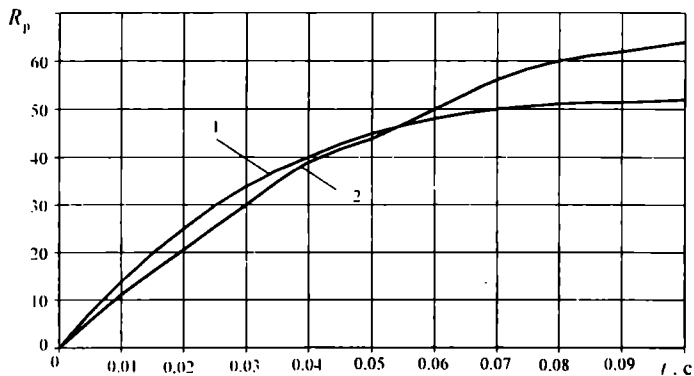


Рис. 6. Зависимость относительного радиуса зоны разрушения алевролита от времени: 1 – заряд без водной оболочки; 2 – заряд с водной оболочкой

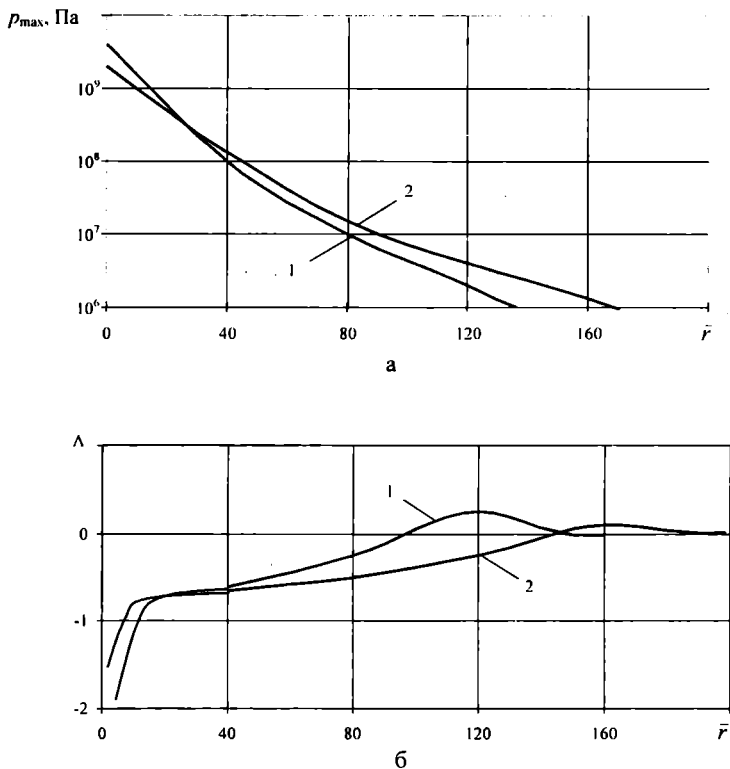


Рис. 7. Зависимость от относительного расстояния $\bar{r} = r/r_0$ максимального давления (а) и скорости дилатансии (б) в алевролите: 1 – заряд без водной оболочки; 2 – заряд с водной оболочкой

Из проведенных исследований вытекает, что эффект дилатансии является одним из основных механизмов деформирования горных пород при взрывах. Особенности поведения геоматериалов при положительных и отрицательных скоростях дилатансии, а также методы воздействия на их величину, одним из которых является создание водного зазора вокруг заряда ВВ, необходимо учитывать для более эффективного управления взрывным импульсом.

1. Мельников Н.В., Марченко Л.Н. К вопросу о работе и механизме действия взрыва в твердых средах // Взрывное дело, № 45/2. – Москва: Недра, 1963, С. 9–21.

2. *Родионов В.Н.* К вопросу о повышении эффективности взрыва в твердой среде. – Изд-во Ин-та горного дела АН СССР, 1962. – 23 с.
3. *Кузнецов В.М.* О коэффициенте полезного действия взрыва в грунте // ПМТФ. – № 4. – 1963. – С. 30–34.
4. *Баум Ф.А., Григорян С.С., Санасарян Н.С.* Определение импульса взрыва вдоль образующей скважины и оптимальных параметров скважинного заряда // Взрывное дело. – № 54/11. – 1964. – С. 53–102.
5. *Вовк А.А., Черный Г.И., Михалюк А.В.* Основные закономерности взрывов зарядов с воздушными оболочками в грунтах // Использование взрыва в народном хозяйстве. – Киев: Наук. думка, 1970. – С. 115–121.
6. *Мельников Н.В., Марченко Л.Н., Сеинов Н.П. и др.* Заряды с воздушными полостями при взрывах на выброс // Взрывное дело. – № 71/23. – 1972. – С. 5–17.
7. *Друкवानый М.Ф.* Методы управления взрывом на карьерах. – М.: Недра, 1973. – 415 с.
8. *Крюков И.Н.* Взрывная отбойка руд. – М.: Недра, 1985. – 132 с.
9. *Мосинец В.Н.* Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. – М.: Недра, 1976. – 271 с.
10. *Прокопенко В.С.* Обгунтування ефективності вибуху свердловинних зарядів у полімерних оболонках // Вісник НТУ України «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – Київ, 1999. – Вип. 1. – С. 52–67.
11. *Николаевский В.Н., Поляничев А.Н., Сумин Е.О. и др.* Эффекты дилатансии при подземном взрыве. Численные исследования. // ДАН СССР. – 1980. – Т. 250. – № 1. – С. 66–70.
12. *Капустянский С.М., Николаевский В.Н.* Количественная формулировка упругопластической дилатансионной модели (на примере песчаника) // Известия АН СССР. МТТ. – № 4. – 1984. – С. 113–124.
13. *Капустянский С.М., Николаевский В.Н.* Параметры упругопластической дилатансионной модели для геоматериалов // ПМТФ. – 1985. – № 6. – С. 145–150.
14. *Ляхов Г.М.* Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
15. *Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др.* Физика взрыва. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
16. *Лучко И.А., Плаксий В.А., Ремез Н.С. и др.* Механический эффект взрыва в грунтах / Под ред. И.А. Лучко. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.
17. *Уилкинс М.Л.* Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир. – 1967. – С. 212–263.