

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РОСТА ТРЕЩИН ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ НА ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

В.А. Чантурия, Ю.В. Дмитрак, В.А. Атрушкевич, Л.С. Адамова
ИПКОН РАН, г. Москва, Россия.

Аннотация: В статье приведены результаты теоретических исследований, описывающие процесс роста трещин при измельчении горных пород в мельницах различных типов. Отмечено, что измельчение, как часть технологии рудоподготовки, также обусловлено разрушением горных пород с образованием новой поверхности, причем рост трещин значительно возрастает от воздействия мелющих тел на горные породы.

Доказано, что математическое описание движения стенки трещины имеет важное значение в определении способности частиц горных пород разрушаться до заданного размера.

Ключевые слова: мельница, помольная камера, мелющие тела, закон Гриффитса, ударная волна, стенка трещины, уравнения Лагранжа II рода.

PECULIARITIES OF CRACK GROWTH PROCESS UNDER HIGH-FREQUENCY ACTION OF GRINDING BODIES ON ROCKS

V.A. Chanturia, Y.V. Dmitrak, V.A. Atrushkevich, L.S. Adamova

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Abstract: The article presents the results of theoretical studies that describe the process of crack growth during the grinding of rocks in mills of various types. It is noted that grinding, as part of the ore preparation technology, is also due to the destruction of rocks with the formation of a new surface, and the growth of cracks increases significantly from the impact of grinding bodies on rocks.

It has been proven that the mathematical description of crack's wall moving has the important meaning in determination of raw material's particles crash to the given size.

Keywords: mills, mill's chamber, milling bodies, the Griffiths's law, impacting wave, raw materials, crack's wall, the Lagrange II equations.

Тонкое и сверхтонкое измельчение горных пород возможно в мельницах, дезинтеграторах и других горных машинах, осуществляющих помол до среднего размера частиц готовой продукции — 100 мкм. Вид движения помольной камеры, размеры и форма мелющих тел, цикличность процесса измельчения обеспечивают качество готовой продукции в мельницах различных типов. Разнообразны и виды взаимодействия мелющих тел и измельчаемого в помольной камере материала. В процессе измельчения некоторые из трещин начинают расти, достигая критического размера, обуславливающего раскол частицы материала вдоль стенки трещины [1-3]. Естественно, чем больше трещин будут вовлечены в процесс их увеличения до критических значений, тем эффективнее будет происходить процесс измельчения. При этом важнейшее значение имеют исследования взаимодействия ударной волны с трещиной, позволяющие описать движение стенки трещины в момент её развития.

Методы и материалы исследований
(Materials and Methods)

В проведённых исследованиях использован метод представления стенки трещины в виде круглой однородной пластины, которая реагирует на действие ударной волны и отклоняется от положения равновесия.

В общем случае ударный импульс $\xi = f(\sigma; \tau)$ характеризуется интенсивностью действия σ и длительностью τ . По мнению ряда исследователей из-за малого отклонения стенки трещины наиболее благоприятными с точки зрения разрушения материала является нормальное напряжение σ [4-5].

Поверхность отклоняется с поперечной скоростью частиц u в волне напряжения и в момент времени t , прошедший со времени прихода импульса, максимальное отклонение стенки трещины составит $u \cdot t \cdot (1 - b)$ (рис. 1). Падающая и отраженная волны взаимодействуют только в интервале времени $0 \leq t \leq \tau/2$ [8].

Зону суперпозиции волн (расположена между точками, обозначенными на рисунке 1 чёрным цветом) мы принимаем за тонкую однородную пластинку, защемленную по краям. При этом стенка трещины принимает различные формы (рис. 2), описываемые кривыми отклонения, имеющими различные математические выражения.

При $0 \leq t \leq \tau/2$ динамическая кривая отклонения стенки трещины $z(r, y, t)$ должна удовлетворять следующим граничным условиям:

$$\begin{aligned} z(r, y, t)_{r=0} &= 0 & z(r, y, t)_{r=y} &= -utb \\ \left(\frac{\partial z}{\partial r}\right)_{r=y} &= 0 & \left(\frac{\partial z}{\partial r}\right)_{r=0} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

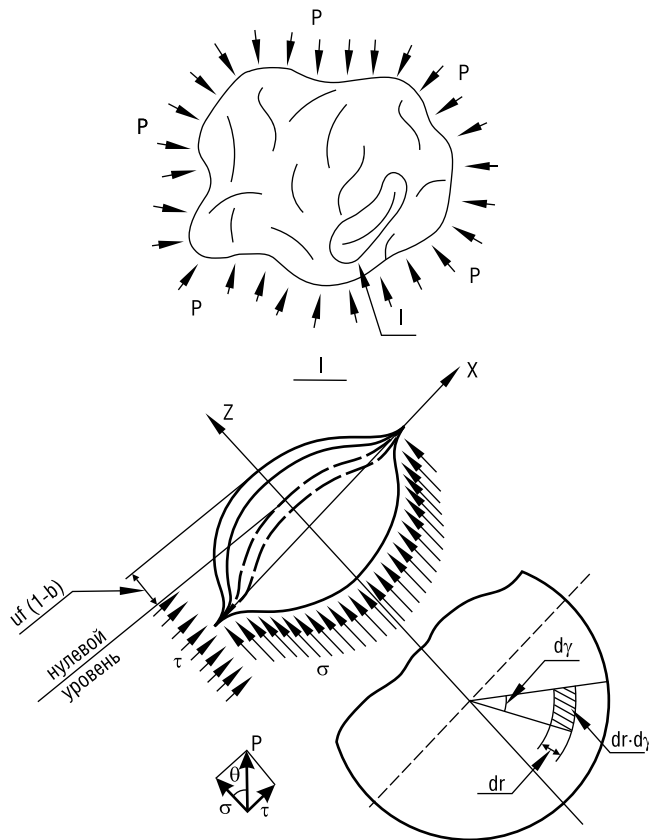


Рис. 1. Расчётная схема движения стенки трещины.

Fig. 1. Calculation scheme of crack wall motion.

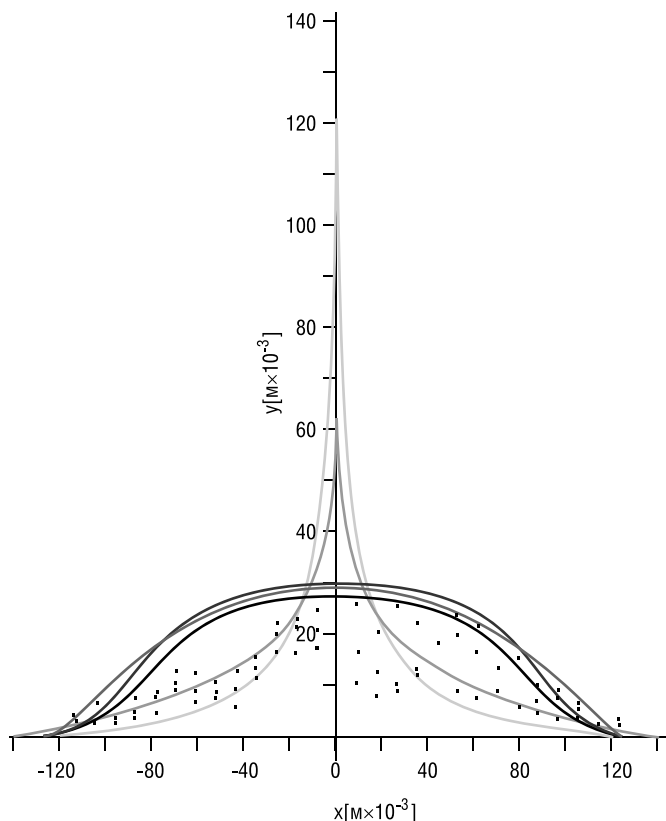


Рис. 2. Возможные (аппроксимационные) формы кривых отклонения стенки трещины.

Fig. 2. Possible (approximation) forms of curves of crack wall deviation.

Всем этим условиям удовлетворяет следующая функция:

$$z(r, y, t) = ut \left(1 - \frac{r^2}{y^2} \right) - utb = ut \left(1 - \frac{r^2}{y^2} - b \right), \quad (2)$$

где b — постоянный, безразмерный коэффициент, зависящий от свойств мелушей загрузки.

Рассмотрим несколько кривых, уравнения которых $y(x)$ позволяют описать форму стенки трещины, находящейся под воздействием ударной волны. Для сравнения результатов полученных вычислений необходимо, чтобы площадь под вышеуказанными кривыми была одинаковой. Математически данный факт выразится следующим соотношением:

$$\int_0^x y_1 dx_1 = \int_0^x y_2 dx_2 = \int_0^x y_3 dx_3 = \int_0^x y dx_n. \quad (3)$$

Это позволит нам корректно подойти к вопросу оценки влияния формы кривой отклонения стенки трещины на параметры ударного импульса.

Для того, чтобы выполнялось выражение (1), найдём выражения для $y(x)$, построив аппроксимационные кривые с применением различных функций (рис. 1).

1. Полиномиальная зависимость:

$$y = -2,11x^4 \cdot 10^{-7} - 0,0004x^2 + 29,78. \quad (4)$$

2. Ортогонально-полиномиальная зависимость:

$$y = -0,0017x^2 + 30,89. \quad (5)$$

3. Логарифмическая зависимость:

$$y = -11,79 \ln x + 66,95.$$

4. Экспоненциальная зависимость:

$$\ln y = -0,75 \ln x + 5,8. \quad (6)$$

5. Арктангенциальная зависимость.

$$y = \arctg(-0,04x + 3,93) + 15,06. \quad (7)$$

Существует много методов расчёта и анализа устойчивости тонкой однородной пластины [5-8]. Для нашего случая идеально подходит метод Лагранжа, позволяющий применить принцип виртуальных перемещений точек системы с несколькими степенями свободы. Для простоты расчётов (не в ущерб качеству) остановимся на системе с одной степенью свободы, приняв в качестве обобщённой координаты длину трещины y . Составим уравнение Лагранжа 2-го рода [9-11]. Для нашего случая метод Лагранжа является идеальным математическим инструментом, позволяющим связать в одном дифференциальном уравнении перемещения и скорости движения стенки трещины с физическими свойствами измельчаемой горной породы и параметрами ударного импульса, возникающего в помольной камере мельницы.

Обозначим:

a — продольная скорость звука в горной породе; ρ — плотность материала.

Уравнение Лагранжа 2-го рода имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} = Q_y, \quad (8)$$

где: T – кинетическая энергия системы, $\dot{y}$ – обобщенная скорость движения стенки трещины, Q_y – обобщенная сила, отнесенная к обобщенной координате [10].

Кинетическая энергия отклоненной стенки трещины равна:

$$T = \int_0^{2\pi} \int_0^y \frac{\rho a t}{2} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 r \cdot dr \cdot d\varphi, \quad (9)$$

где ρ – плотность материала.

Определим

$$\frac{dz}{dt} \text{ и } \left(\frac{dz}{dt} \right)^2:$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{d}{dt} \left(u \cdot t \left(1 - \frac{r^2}{y^2} - b \right) \right) = u \left(1 - \frac{r^2}{y^2} \right) + \frac{2utr^2 \dot{y}}{y^3} - yb \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 &= u^2 \left(1 - \frac{r^2}{y^2} \right)^2 + \frac{4u^2 t^2 r^4 \dot{y}^2}{y^6} + u^2 b^2 + \\ &+ \frac{2u^2 t r^2 \dot{y}}{y^3} \left(1 - \frac{r^2}{y^2} \right) - u^2 b \left(1 - \frac{r^2}{y^2} \right) + \frac{2u^2 t r^2 \dot{y}}{y^3} \left(1 - \frac{r^2}{y^2} \right) - \\ &- \frac{2u^2 t r^2 b \dot{y}}{y^3} - u^2 b \left(1 - \frac{r^2}{y^2} \right) - \frac{2u^2 t r^2 b \dot{y}}{y^3} = u^2 \left(1 - 2 \frac{r^2}{y^2} + \frac{r^4}{y^4} \right) + \\ &+ \frac{4u^2 t^2 r^4 \dot{y}^2}{y^6} + u^2 b^2 - 2u^2 b \left(1 - \frac{r^2}{y^2} \right) - \\ &- \frac{2u^2 t r^2 b \dot{y}}{y^3}. \end{aligned} \quad (11)$$

В итоге, используя полученные выражения в (9), сформируем выражение для кинетической энергии системы:

$$\begin{aligned} T &= \int_0^{2\pi} \int_0^y \frac{\rho a t}{2} \left(u^2 \left(1 - 2 \frac{r^2}{y^2} + \frac{r^4}{y^4} \right) + \frac{4u^2 t r^4 \dot{y}^2}{y^6} \left(1 - \frac{r^2}{y^2} \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{4u^2 t^2 r^4 \dot{y}^2}{y^6} + u^2 b^2 - 2u^2 b \left(1 - \frac{r^2}{y^2} \right) - \frac{2u^2 t r^2 b \dot{y}}{y^3} \right) r dr d\varphi \\ T &= \frac{2\pi \rho a t}{2} \left(u^2 \left(\frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{2y^2} + \frac{r^6}{6y^4} \right) + \frac{4u^2 t r^4 \dot{y}}{4y^3} - \frac{4u^2 t \dot{y} r^6}{6y^5} + \right. \\ &+ \left. \frac{4u^2 t^2 r^6 \dot{y}^2}{6y^6} + u^2 b^2 \frac{y^2}{2} - \frac{u b y^3}{2} - \frac{u^2 b t y \dot{y}}{2} \right) \\ T &= \frac{\pi \rho a t u^2}{6} (y^2 + 2t y \dot{y} + 4t^2 \dot{y}^2) + \pi \rho a t u^2 (b^2 \frac{y^2}{2} - \frac{b y^2}{2} - \frac{b t y \dot{y}}{2}) = \\ &= \pi \rho a t u^2 \left(\frac{1}{6} (y^2 + 2t y \dot{y} + 4t^2 \dot{y}^2) + \frac{1}{2} (b^2 y^2 - b y^2 - b t y \dot{y}) \right) = \\ &= \frac{\pi \rho a t u^2}{6} (y^2 + 2t y \dot{y} + 4t^2 \dot{y}^2 + 3b^2 y^2 - 3b y^2 - 3b t y \dot{y}). \end{aligned} \quad (12)$$

Продифференцируем выражение для кинетической энергии системы по обобщенным скорости и координате:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} &= \frac{\pi \rho a t u^2}{6} (2ty + 8t^2 \dot{y} - 3bty) = \frac{\pi \rho a t^2 u^2 y}{3} + \\ &+ \frac{4\pi \rho a t^3 u^2 \dot{y}}{3} - \frac{\pi \rho a t^2 u^2 b y}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{\pi \rho a t u^2}{6} (2y + 2t \dot{y} + 6b^2 - 6b - 3bt \dot{y}) = \frac{\pi \rho a t u^2 y}{3} + \\ &+ \frac{\pi \rho a t^2 u^2 \dot{y}}{3} + \pi \rho a t u^2 b^2 - \pi \rho a t u^2 b - \frac{\pi \rho a t^2 u^2 b \dot{y}}{2} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) &= \frac{2\pi \rho a t u^2 y}{3} + \frac{\pi \rho a t^2 u^2 \dot{y}}{3} + 4\pi \rho a t^2 u^2 \dot{y} + \\ &+ \frac{4\pi \rho a t^3 u^2 \ddot{y}}{3} - \pi \rho a t u^2 b \dot{y} - \frac{\pi \rho a t^2 u^2 b \ddot{y}}{2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Найдем правую часть равенства (8).

Обобщенная сила Q складывается из обобщенных потенциальных сил, обобщенных сил вызывающих образование новой поверхности, и обобщенной диссипативной силы:

$$Q_y = Q_y^{nom} + Q_y' + Q_y^{дис}. \quad (16)$$

Потенциальная энергия системы:

$$\Pi = \Pi_\sigma - \Pi_p, \quad (17)$$

где Π_σ – потенциальная энергия деформации стенки трещины под действием ударной волны с амплитудой σ ; Π_p – потенциальная энергия предварительного нагружения стенки трещины, (эта энергия расходуется на образование новых трещин на ранних стадиях добычи – при отбойке и дроблении) [10, 12].

Выберем за нулевой уровень положение стенки трещины в момент, когда ударный импульс еще не успел ее отклонить ($t = 0$ на рис. 1).

Элементарная работа импульса нагружения σ равна $dA_\sigma = z \cdot \sigma \cdot r dr d\varphi$.

Тогда

$$\begin{aligned} A_\sigma &= u \cdot t \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^y \left(1 - \frac{r^2}{y^2} - b \right) \cdot \sigma \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi = \\ &= \pi u t \sigma \cdot \left(r^2 - \frac{r^4}{2y^2} - b r^2 \right) \Big|_0^y = \pi u t \sigma \cdot \left(\frac{y^2}{2} - b y^2 \right) = \\ &= \pi u t \sigma y^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - b \right). \end{aligned} \quad (18)$$

По известной формуле механики [10, 11] находим

$$\Pi_\sigma = -A_\sigma = -\pi u t \sigma y^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - b \right). \quad (19)$$

$$A_p = \frac{5}{32} \int_0^{2\pi} \int_0^y \frac{\sigma y^3}{u t} \left(\frac{\partial z}{\partial r} \right)^2 dr d\varphi \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial r} &= -\frac{2utr}{y^2} \quad \left(\frac{\partial z}{\partial r} \right)^2 = \frac{4u^2 t^2 r^2}{y^4} \\ A_p &= \frac{5}{32} \int_0^{2\pi} \int_0^y \frac{\sigma y^3}{u t} \left(\frac{\partial z}{\partial r} \right)^2 dr d\varphi = \frac{5\pi}{4} \int_0^y \frac{\sigma u t r^2 dr}{y} = \frac{5}{12} \frac{\pi \sigma u t r^3}{y} \Big|_0^y = \frac{5\pi \sigma u t y^2}{12} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\Pi_p = -A_p = -\frac{5\pi \sigma u t y^2}{12}. \quad (22)$$

Подставим выражения (19) и (22) в (17):

$$\Pi = \left(-\pi u t \sigma \left(\frac{1}{2} - b \right) + \frac{5\pi \sigma u t}{12} \right) y^2 = -\frac{\pi \sigma u t y^2}{12} + \pi \sigma u b t y^2 \quad (23)$$

Известно, что для потенциальных сил $Q_y^{\text{пот}} = -\frac{\partial \Pi}{\partial y}$,

где $Q_y^{\text{пот}}$ – суммарная обобщенная потенциальная сила.

$$Q_y^{\text{пот}} = -\frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\pi \sigma u t y^2}{12} + \pi \sigma u b t y \right) = \frac{\pi \sigma u t y}{6} - \pi \sigma u b t. \quad (24)$$

Работа сил, вызывающих образование новой поверхности, согласно [12] равна

$$A_y = 2\pi(y^2 - b y_0^2) \gamma, \quad (25)$$

где y_0 – начальная ширина трещины.

Вычислим обобщенную силу, учитывающую образование новой поверхности.

$$Q_y^{\gamma} = -\frac{\partial \Pi_{\gamma}}{\partial y} = \frac{\partial A_{\gamma}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (2\pi(y^2 - b y_0^2) \gamma) = 4\pi \gamma y. \quad (26)$$

Вычислим обобщенную диссипативную силу $Q_y^{\text{дис}}$. Эта сила учитывает демпфирующие свойства материала.

$$Q_y^{\text{дис}} = -\frac{\partial D}{\partial \dot{y}}, \quad (27)$$

где D – диссипативная функция или функция рассеяния энергии Рэлея [13], $D = \mu \dot{y}^2 / 2$, где μ – коэффициент демпфирования [$\text{н} \cdot \text{с} / \text{м}$].

$$Q_y^{\text{дис}} = -\mu \dot{y}. \quad (28)$$

Суммарная обобщенная сила равна:

$$Q_y = Q_y^{\text{пот}} + Q_y^{\gamma} + Q_y^{\text{дис}} = \frac{\pi \sigma u t y}{6} - \pi \sigma u b t + 4\pi \gamma y - \mu \dot{y}. \quad (29)$$

Подставим полученные выражения (14), (15) и (29) в уравнение (8)

$$\begin{aligned} & \frac{\pi \sigma u t^2 y}{3} + \frac{\pi \sigma u t^2 u^2 \dot{y}}{3} + 4\pi \sigma u t^2 u^2 \dot{y} + \frac{4\pi \sigma u t^3 u^2 \dot{y}}{3} - \pi \sigma u t^2 b y - \\ & - \frac{\pi \sigma u t^2 u^2 b \dot{y}}{2} - \frac{\pi \sigma u t^2 u^2 \dot{y}}{3} - \pi \sigma u t^2 b^2 + \pi \sigma u t^2 b + \frac{\pi \sigma u t^2 u^2 b \dot{y}}{2} = \\ & = \frac{\pi \sigma u t y}{6} - \pi \sigma u b t + 4\pi \gamma y - \mu \dot{y}. \end{aligned} \quad (30)$$

Результаты исследований (Results)

Составлено дифференциальное уравнение, определяющее условие роста трещины. Получены зависимости, связывающие энергетические параметры процесса роста трещины с параметрами ударной волны и размером трещины. Определены виды кривой отклонения стенки трещины, находящейся под действием ударной волны.

Обсуждение результатов исследований (Discussion)

На рисунке 3 представлены зависимости потенциальной энергии деформации стенки трещины от её перемещения (выражение (19)). Анализ зависимостей, представленных на рисунке 3, говорит о том, что потенциальная энергия деформации стенки трещины находится в парабол-

лической зависимости от перемещения стенки трещины, причём вид горной породы, её прочность оказывают существенное влияние на величину потенциальной энергии деформации и при прочих равных условиях влияет на общую величину энергии, которым должно обладать мелющее тело, способное разрушать частицы горных пород до заданной величины.

На рисунке 4 представлены зависимости обобщённой потенциальной силы от интенсивности действия ударного импульса (выражение (24)). Анализ зависимостей, представленных на рисунке 4, говорит о том, что обобщённая потенциальная сила находится в линейной зависимости от интенсивности действия ударного импульса.

Данный вывод позволяет рассчитать технологические и кинематические параметры мельниц, которые обеспечат необходимую величину ударной силы, с которой мелющее тело должно воздействовать на частицы горных пород для измельчения их до заданной величины.

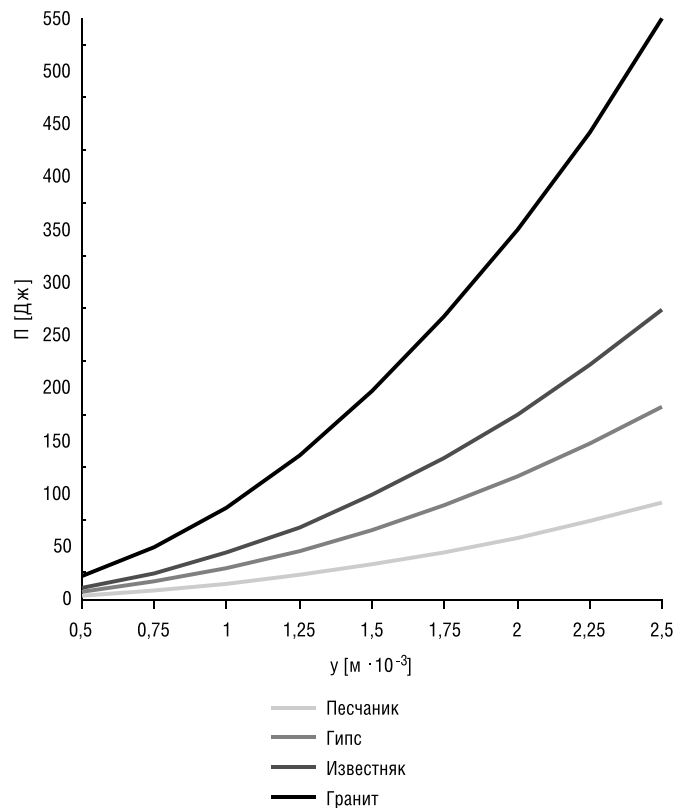


Рис. 4. Зависимости обобщённой потенциальной силы от интенсивности действия ударного импульса.

Fig. 4. Dependences of the generalized potential force on the intensity of the impact impulse.

Заключение / Conclusion

Применение Уравнений Лагранжа II рода позволило установить зависимости между энергетическими параметрами процесса роста трещины, параметрами ударной волны и размером трещины, а также определить виды кривой отклонения стенки трещины, находящейся под действием ударной волны. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Протасов Ю.Л. Разрушение горных пород. М., МГГУ, 1995, 453с.
2. Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогацкий Л.П. и др. Селективное разрушение минералов. М., Недра, 1988, 286 с.
3. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. - М.:Наука. Гл.ред. физ.-мат. Лит., 1987. - 80 с.
4. Steverding B., Lehnigk S.H. «Collision of stress pulses with obstacles and dynamics of fracture».-Journal of Applied Physics, 1991, v.42, #8,p.3231-3238.
5. Steverding B., Lehnigk S.H. «Fracture by shear waves».- Journal of Applied Physics, 1992, v.43, #1,p.69-73.
6. Дмитрак Ю.В. Теория движения мелющей загрузки и повышение эффективности оборудования для тонкого измельчения горных пород. Дисс. док. техн. наук. . - М, 2000 г.. - 430с.
7. Бабаков И.М. Теория колебаний. М., Наука, 1968, 560с.
8. Цзе Ф.С., Морзе И.Е., Хинкл Р.Т. Механические колебания. М., Машиностроение, 1966, 507с.
9. Мусалимов В.М., Сергушин П.А. Аналитическая механика. Уравнение Лагранжа второго рода. Свободные колебания. - С-Пб: СПбГУ ИТМО. 2007,с. 53.
10. Андрианов И.В., Данишевский В.В., Иванков А.О. Асимптотические методы в теории колебаний балок и пластин. - Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2010 г., 217 с.
11. Кутузов Б.Н., Рубцов В.К. Физика взрывного разрушения горных пород Москва: МГИ, 1970. -176 с.
12. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Резванов Р.А., Африкян А.Н. Промысловая геофизика: Учебник для вузов /Под ред. В. М. Добрынина. - М.: Недра, 1986. с. 342.
13. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М., Высшая школа, 1990, 607 с.
14. Вибрация, удар и контроль технического состояния. Термины и определения. ГОСТ Р ИСО 2041-2012, актуализирован 01.01.2021. М.: Стандартиформ, 2019.

REFERENCES

1. Protasov Yu.L. Destruction of rocks. M., MGGU, 1995, 453 p.
2. Revnivitsev V.I., Gaponov G.V., Zarogatsky L.P. and other Selective destruction of minerals. M., Nedra, 1988, 286 s.
3. Rabotnov Yu.N. Introduction to fracture mechanics. - M.: Science. Chief editor Phys.-Math. Lit., 1987. - 80 p.
4. Steverding B., Lehnigk S.H. «Collision of stress pulses with obstacles and dynamics of fracture».-Journal of Applied Physics, 1991, v.42, #8,p. 3231-3238.
5. Steverding B., Lehnigk S.H. «Fracture by shear waves».- Journal of Applied Physics, 1992, v.43, #1,p.69-73.
6. Dmitrak Yu.V. The theory of movement of the grinding load and improving the efficiency of equipment for fine grinding of rocks. Diss. doc. tech. Sciences - M, 2000. - 430s.
7. Babakov I.M. Theory of vibrations. M., Nauka, 1968, 560 s.
8. Tse F.S., Morse I.E., Hinkle R.T. Mechanical vibrations. M., Mashinostroenie, 1966, 507 p.
9. Musalimov V.M., Sergushin P.A. Analytical mechanics. The equation Lagrange of the second kind. Free vibrations. - St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO. 2007, p. 53.
10. Andrianov I.V., Danishevsky V.V., Ivankov A.O. Asymptotic methods in the theory of oscillations of beams and plates. - Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2010, 217 p.
11. Kutuzov B.N., Rubtsov V.K. Physics of explosive destruction of rocks Moscow: MGI, 1970. -176 p.
12. Dobrynin V.M., Vendelshtein B.Yu., Rezvanov R.A., Afrikyan A.N. Production Geophysics: Textbook for High Schools / Ed. V. M. Dobrynina. - M.: Nedra, 1986. p. 342.
13. Nikitin N.N. Course of theoretical mechanics. M., Higher School, 1990, 607p.
14. Vibration, shock and technical condition control. Terms and Definitions. GOST R ISO 2041-2012, updated on 01/01/2021. M.: Standartinform, 2019.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Чантурия Валентин Алексеевич:**

доктор технических наук,
профессор,
академик РАН, советник РАН,
главный научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем комплексного
освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук,
г. Москва, Россия,
vchan@mail.ru

**Дмитрак Юрий Витальевич:**

доктор технических наук,
профессор,
главный научный сотрудник отдела Моделирования
геотехнических систем, ,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем комплексного
освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук,
г. Москва, Россия,
dmitrak@yandex.ru

**Атрушкевич Виктор Аркадьевич:**

доктор технических наук,
профессор,
ведущий научный сотрудник отдела Моделирования
геотехнических систем, ,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем комплексного
освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук,
г. Москва, Россия,
iugi@mail.ru

**Адамова Людмила Станиславовна:**

аспирант отдела Моделирования геотехнических
систем, ,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем комплексного
освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук,
г. Москва, Россия,
adamovamila16@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chanturia Valentin Alexeevich:

Doctor of Engineering Sciences,
professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences,
Advisor to the Russian Academy of Sciences,
Chief Researcher scientist,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
Resources RAS,
Moscow, Russia,
vchan@mail.ru

Dmitrak Yuriy Vitalievich:

Doctor of Technical Sciences,
professor,
chief research scientist of the Department of Design
Theory of Subsoil Development,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
Resources RAS,
Moscow, Russia,
dmitrak@yandex.ru

Atrushkevich Viktor Arkadievich:

Doctor of Technical Sciences,
professor,
Leading Researcher of the Department of Design
Theory of Subsoil Development,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
Resources RAS,
Moscow, Russia,
iugi@mail.ru

Adamova Ludmila Stanislavovna:

Postgraduate of the Department of Design Theory
of Subsoil Development,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
Resources RAS,
Moscow, Russia,
adamovamila16@yandex.ru



КАЗАНСКИЙ ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Информируем Вас



Подготовка студентов в Институте геологии и нефтегазовых технологий ведется по 2-м направлениям:
05.03.01 Геология и 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Контакты: 420008, Казань, Кремлевская 4/5, Институт геологии нефтегазовых технологий
Тел/факс: (843) 233-71-61. E-mail: geofak@kpfu.ru

WWW.N-GN.RU