



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.235.1:539.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-13-19

## МЕХАНИЗМ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ОБЪЕМОВ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПУТЕМ РАСПОРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТЕНКИ ШПУРА

Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Целью работы является разработка методологических основ постановки и решения ряда практически важных задач горного производства через анализ механизма квазихрупкого разрушения твердых тел. При этом решалась задача по определению энергосиловых условий разрыва принятой модели в виде полового цилиндра, нагруженного внутренним давлением, в рамках силового подхода квазистатической теории. Разработанная расчетная схема строилась как трехэтапная, когда на первом этапе исследуется состояние сплошности твердого упругохрупкого тела, а на втором – состояние предразрушения, в котором генерируются (зарождаются) трещины нормального разрыва критической величины, третий этап характеризуется состоянием роста трещин как сквозных, разделяющих кусок породы на отдельные части. Принятие силового подхода в расчетной схеме предопределяет развитие исследований напряженно-деформированного состояния поверхности шпура также по трехэтапной схеме, когда наряду с напряженно-деформированным состоянием с сохранением сплошности определяются дополнительные локальные деформации и напряжения поверхности шпура в связи с раскрытием трещины разрыва. Разработанная методология постановки и решения задачи с позиции механической и физической теорий прочности представляет собой базовую расчетную модель разрушения горной породы, которая является основополагающей для решения ряда практических задач горного производства, так как включает последние достижения прикладной науки о разрушении квазихрупких материалов.

**Ключевые слова:** квазихрупкое тело, внутришпуровое давление, кинетика трещинообразования, предельное давление разрыва, энергоемкость разрыва

© Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г., 2024

### Для цитирования

Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г. Механизм квазистатического разрушения объемов горной породы путем распорного воздействия на стенки шпура // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 13-19. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-13-19>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# MECHANISM OF QUASI-STATIC FRACTURE OF ROCK VOLUMES BY A SPREADING ACTION ON THE BOREHOLE WALLS

Pershin G.D., Pshenichnaya E.G.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The research is aimed at developing a methodological framework for setting and solving a number of mining production problems of practical importance by analyzing the mechanism of quasi-brittle fracture of solid bodies. At the same time, the authors solved the problem of determining the energy and force conditions of fracture of the accepted model in the shape of a hollow cylinder loaded with internal pressure as part of the force approach of quasi-static theory. The developed calculation scheme was built as a three-stage one, when at the first stage we studied the state of continuity of an elastic-brittle solid, and at the second stage, the state of pre-fracture, when normal fracture cracks of critical size were generated (nucleated); the third stage was characterized by the state of crack growth as through cracks separating a piece of rock into separate parts. The force approach adopted in the calculation scheme predetermines the development of studies on the stress and strain state of the borehole surface also according to the three-stage scheme, when along with the state of continuity local deformations and stresses of the borehole surface are determined in connection with the opening of fracture cracks. The developed methodology of problem formulation and solution from the position of mechanical and physical theories of strength is a basic calculation model of rock fracture, which is fundamental for solving a number of practical problems of mining, as it includes the latest achievements of applied science on fracture of quasi-brittle materials.

**Keywords:** quasi-brittle body, intra-borehole pressure, cracking kinetics, ultimate fracture pressure, fracture energy intensity

## For citation

Pershin G.D., Pshenichnaya E.G. Mechanism of Quasi-Static Fracture of Rock Volumes by a Spreading Action on the Borehole Walls. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 13-19. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-13-19>

## Введение

Способы добычи горных пород, а также природного камня, объединяемые буроразрывающим принципом отделения строчкой шпуров объемов различной крупности от массива, в настоящее время широко применяются, а в случаях высокопрочных пород являются единственно эффективными [1]. Сюда относят такие наиболее распространенные способы, как буроклиновой с применением механических клиньев, гидроклиньев, гидрораскалывающих устройств (ГРУ), невзрывчатых разрушающих смесей (НРС) и буровзрывной.

Шпуровой способ с использованием различных распорных средств, воздействующих на стенки одиночного шпура и таким образом разрывающих объем горной породы нормальными трещинами, применяется с начала зарождения горного производства до настоящего времени [2]. Причиной такого долголетия является низкая трудоемкость и энергоемкость образования трещин нормального разрыва в массиве либо отдельном блоке. Этому способствует природное свойство горных пород разрушаться разрываясь за счет низкого значения предела прочности на растяжение по сравнению с пределом прочности на сжатие. Предел прочности породы на растяжение в 10-15 и более раз ниже, чем прочность на сжатие, что и обуславливает эффективность разрушения, когда при направленном отделении объемов камня прикладываются преимущественно растягивающие напряжения [3].

На практике в процессе добычных работ для направленной отбойки монолитов, блоков камня от массива применяют продольные и поперечные строчки шпуров. Одиночные шпуры применяют в основном для разрушения негабарита [4]. Одиночный шпур является базовым элементом в системе строчки шпуров, где происходит линейная суперпозиция деформаций разрушения от смежных шпуров. Поэтому механизм зарождения и развития трещин вокруг одиночного шпура в результате распорного статического давления на его стенки относится к классической задаче теории квазихрупкого разрушения горных пород. Разделение негабарита в виде блока, монолита неправильной формы на не связанные между собой куски относится к процессам вторичного дробления и обусловлено требованиями безопасности транспортировки из карьера горной массы и технологическими требованиями дробильного производства.

Будем рассматривать случай равномерно-прикладываемого статического давления на стенки шпура по всей его глубине, что достигается применением распорных средств статического действия, например невзрывчатых разрушающих смесей [5]. Напряженно-деформированное состояние в горной породе за стенками шпура (скважины) примем на основе задачи Ляме для толстостенного цилиндра, нагруженного внутренним давлением  $p$ , при этом внутренний диаметр цилиндра определяет диаметр шпура  $r_{ш}$ , а внешний является окружностью радиусом  $R$ , описываю-

щей поперечное сечение негабарита. Решение поставленной задачи в соответствии с её основной целью – обоснование механизма разрушения горной породы посредством распорного средства, воздействующего на контур одиночного шпура, – будем рассматривать в квазистатической постановке по трехэтапной схеме расчета [6], когда на первом этапе исследуется состояние сплошности твердого упруго-хрупкого тела, а на втором – состоянии предразрушения, когда зарождаются трещины нормального разрыва до критической величины, третий этап характеризуется состоянием, при котором часть зародышевых трещин развивается по величине до сквозных, разделяющих крупноблочный кусок на отдельные части. При этом конечные расчетные зависимости второго и третьего этапов определяются наличием и проявлением пластических деформаций при разрыве конкретной горной породы согласно концепции разрушения квазихрупкого тела, которую характеризуют такие константы материала, как [7]:

- удельная поверхностная энергия  $\gamma_p$ , Дж/м<sup>2</sup>;
- комплексный показатель текстурно-структурных свойств  $k_{кс}$ ,  $\sqrt{M}$ ;
- предел прочности на одноосное растяжение  $\sigma_p$ , Па;
- модуль упругости  $E$ , Па;
- коэффициент Пуассона  $\mu$ .

#### Методология исследования

Напряженно-деформированное состояние (НДС) сплошного упругохрупкого тела для момента, когда возникают условия разрыва на контуре шпура, как следует из работы [8], характеризуется следующими физическими уравнениями (принята цилиндрическая система координат):

$$\sigma_r^{\max} = \sigma_{\text{раз}} = p\chi_n; \quad \sigma_\theta^{\max} = -p; \quad (1)$$

$$\varepsilon_r^{\max} = \varepsilon_{\text{раз}} = \frac{p}{E}(\chi_n + \mu); \quad \varepsilon_\theta^{\max} = -\frac{p}{E}(1 + \mu\chi_n), \quad (2)$$

где  $p$  – предельное статическое давление на контуре шпура, обеспечивающее его сплошность, Па;  $E$ ,  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала горной породы, Па;  $\chi_n = \frac{n^2 + 1}{n^2 - 1}$  – безразмерный геометрический параметр ( $n = R/r_{\text{ш}}$ ).

Относительный параметр  $n$  определяет в модели полого цилиндра при заданном значении  $r = r_{\text{ш}}$  толщину его стенки.

Уравнения системы (1) дают возможность для условий совместного действия сжимающих и растягивающих напряжений на основе энергетической теории прочности для сплошного тела определять максимальные разрывающие напряжения на контуре шпура в зависимости от параметра  $\chi_n$ , который, в свою очередь, является функцией параметра  $n$ :

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_p = p\sqrt{\chi_n^2 + \chi_n + 1}. \quad (3)$$

На рисунке в графическом виде приведена зависимость (3) влияния в модели полого цилиндра безразмерного показателя  $n$  на предельное разрывающее контур шпура напряжение по отношению к внешней нагрузке. Анализ системы уравнений (1) и графической зависимости рисунка показывает, что при  $n \rightarrow 1$ , то есть при толщине стенки, стремящейся к нулю, окружное растягивающее напряжение  $\sigma_t$  асимптотически стремится к бесконечности, а при  $n \geq (4 - 5)$  параметр  $\chi_n \rightarrow 1$ , что соответствует случаю чистого сдвига материала горной породы, когда окружное напряжение  $\sigma_t$  равно радиальному  $\sigma_r$ . В этом случае уравнение (3) преобразуется до вида  $\sigma_p = \sqrt{3}p$ , что дает возможность на контуре шпура определить взаимосвязь предельных значений внешней нагрузки  $p$  и разрывной прочности деформируемого материала  $\sigma_p$  для крупноблочных отдельностей горной породы.

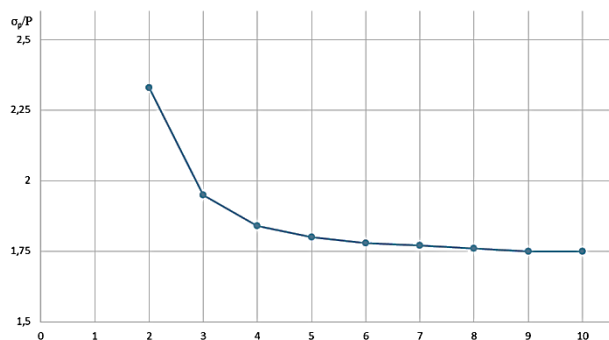


Рисунок. Зависимость относительного предельного напряжения разрыва на контуре шпура от параметра  $n$ , характеризующего толщину стенки в модели полого цилиндра

Figure. Dependence between relative ultimate fracture stress on the borehole contour and parameter  $n$  characterizing wall thickness in a hollow cylinder model

Очевидно, что эквивалентное напряжение (3) на контуре шпура, достигшее предельного напряжения разрыва материала горной породы  $\sigma_p$ , определяет критическое давление в шпуре  $p = p_c$ , при котором создаётся предельное НДС, когда упругохрупкое тело ещё сохраняет свою целостность, то есть сплошность. Предельное состояние сплошности материала горной породы с позиции классической теории прочности характеризуется также коэффициентом концентрации напряжений, который определяется на контуре шпура как относительное превышение предела прочности на одноосное растяжение  $\sigma_p$  по сравнению с внешней нагрузкой  $K_\sigma = \frac{\sigma_p}{p_c} = \sqrt{3}$ .

Отмеченные предельные показатели НДС (1)-(3), полученные на основе механики твердого тела, характеризуют первый этап расчетной схемы, когда деформируемое тело еще сохраняет целостность в

местах локальной концентрации напряжений, которые при дальнейшем нагружении являются источником образования зародышевых трещин.

Методическую основу второго и третьего этапов расчетной схемы квазистатического разрушения упруго хрупких материалов составляет рассмотрение процесса образования зародышевых трещин и их развития до предельных значений, разрывающих твердое тело на отдельные, не связанные между собой части. При этом данный процесс характеризуется количественными показателями, которые устанавливаются путем аналитического обоснования числа зародышевых трещин и их количества, получивших развитие в качестве сквозных.

Детальный анализ второго этапа расчетной схемы как этапа предразрушения проведен в работе [6], где на основе задачи Ляме, рассматривающей предельное равновесие полого цилиндра, моделирующего некоторый объем твердого тела, деформированного равномерно распределенным шпуровым давлением распорных средств, были получены следующие, полностью характеризующие данный этап энергосиловые показатели и параметры:

– характерный размер зоны предразрушения, определяемый в виде равенства длины зародышевой трещины разрыва на поверхности шпура его радиусу:

$$l_{\text{тр.з.}} = r_{\text{ш}};$$

– предельная (критическая) нагрузка  $\rho_k$ , по достижении которой наступает локальный разрыв:

$$\rho_k = \frac{k_k}{\sqrt{\pi r_{\text{ш}}}}; \quad (4)$$

– удельная энергия, которую необходимо затратить на образование единицы поверхности разрыва критической величины:

$$\gamma = k_k^2 \frac{\sigma_p^2}{2E}; \quad (5)$$

– число зародышевых трещин в зоне предразрушения:

$$n_{\text{тр.з.}} = 2\sqrt{2}(1 + \mu). \quad (6)$$

На третьем этапе расчетной схемы окончательно устанавливаются искомые показатели и параметры как предельные величины процесса разрыва исследуемой модели, а именно [6]:

– взаимосвязь удельных поверхностных энергий, характеризующих зоны развития как зародышевых (критических), так и сквозных трещин нормального разрыва:

$$e_\gamma = \frac{\gamma}{\gamma_p} = \frac{2}{n^2 - 2}, \quad (7)$$

– удельную поверхностную энергию, которую необходимо затратить на разделение объема куска горной породы на отдельные части:

$$\gamma_p = \frac{\gamma}{e_\gamma} = k_k^2 \cdot \frac{\sigma_p^2}{2E} \cdot \frac{n^2 - 2}{2}, \quad (8)$$

– число сквозных трещин нормального разрыва:

$$n_{\text{тр.с.}} = n_{\text{тр.з.}} \frac{\chi}{\sqrt{2}} = 2\chi(1 + \mu), \quad (9)$$

где  $e_\gamma$  – энергетический коэффициент полезного действия (КПД) процесса нормального разрыва квазихрупких материалов.

На основе полученных энергосиловых показателей и параметров, характеризующих все три взаимосвязанных этапа расчетной схемы, в работе [6] формулируется и составляется энергетический баланс необратимо затраченной работы при разрушении квазихрупких материалов. Разработанный энергетический подход позволил определить предельное шпуровое давление как разрывающую кусок породы нагрузку и зависимость от её величины удельную работу разрушения распорного средства. При этом надо отметить, что энергетический баланс составлен без учета деформаций раскрытия трещин от локального разрыва поверхности шпура, то есть практически на базе напряженно-деформированного состояния сплошного твердого тела. Для более корректного расчета энергосиловых показателей необходимо учитывать локальные деформации разрыва в области шпура, так как они увеличивают необходимое распорное воздействие на стенки шпура по объемному расширению, которое обеспечит работу разрыва, соответствующую размерам куска и его физико-механическим свойствам. В этом случае энергетическая эффективность распорного средства должна соответствовать его деформационно-силовым показателям, когда гарантированно произойдет разрыв куска на части.

Поставленная цель достигается в рамках общего подхода линейной теории разрушения квазихрупких материалов на основе решения задачи по определению удельной энергии разрыва куска породы на отдельные части распорными средствами через одиночный шпур по следующей зависимости [9]:

$$\Xi = \frac{1}{2} \sigma_{\text{раз}} \cdot \varepsilon_z = \frac{1}{2} \chi_n \cdot \rho_p \cdot \varepsilon_\Sigma, \quad (10)$$

где  $\sigma_{\text{раз}}$  – напряжение разрыва куска породы, Па;  $\rho_p$  – внутришпуровое предельное давление, Па;  $\varepsilon_\Sigma$  – предельная деформация разрыва на стенке шпура с учетом раскрытия трещины разрыва.

Внутришпуровое предельное давление рассчитаем путем использования квазистатического силового условия согласно работе [10]:

$$\rho_p = \rho_k \sqrt{\frac{l_{тр}/l_k}{e_\gamma} + 1}, \quad (11)$$

где  $l_{тр} = r_{ш}(n - 1)$  – длина сквозной трещины, м;  $l_k = r_{ш}$  – длина критической (зародышевой) трещины, м.

Подстановка в (11) значений  $l_{тр}$ ,  $l_k$  и величины энергетического КПД разрыва согласно выражения (7) дает окончательную зависимость для нахождения искомой величины силового показателя:

$$\rho_p = \rho_k \sqrt{(n-1) \cdot \frac{n^2 - 2}{2} + 1}. \quad (12)$$

Для расчета предельной упругой деформации начала разрыва стенки шпура и раскрытия трещины за счет взаимного смещения её берегов по мере прорастания до критической величины  $l_{тр.к}$  обратимся к выражению деформации растяжения периметра поверхности шпура (2) и на его основе, согласно работе [6], рассмотрим состояние перехода (П-состояние) от сплошности твердого тела (С-состояние) к его разрушению путем разрыва (Р-состояние). Переходное состояние как состояние предразрушения характеризуется следующими показателями и параметрами:  $n = 2$ ;  $\chi_k = 5/3$ ;  $l_{тр.к} = r_{ш}$ , при этом зарождение трещины разрыва происходит при шпуровом давлении  $\rho = \rho_k$ , а развитие до критической величины при давлении  $\rho = \sqrt{2}\rho_k$ . С учетом отмеченных характеристик и силовых условий П-состояния деформация зарождения разрыва поверхности шпура как критическая величина перехода из С-состояния в П-состояние принимает вид

$$\varepsilon_k = \frac{\chi_k + \mu}{E} \rho_k, \quad (13)$$

а деформация развития трещины до критической величины

$$\varepsilon_{р.к} = \frac{\chi_k + \mu}{E} \sqrt{2} \rho_k. \quad (14)$$

Так как зависимость (14) включает и деформацию растяжения контура шпура (13), то очевидно, что развитие трещины до критической величины и её раскрытие будет характеризовать деформационный показатель

$$\delta_k = \varepsilon_{р.к} - \varepsilon_k = \frac{\chi_k + \mu}{E} \cdot \rho_k \cdot (\sqrt{2} - 1) = k_\delta \cdot \varepsilon_k. \quad (15)$$

В принятой расчетной схеме НДС на контуре шпура использована линейная модель деформации раскрытия трещины разрыва  $\delta$  от внешней распорной нагрузки  $\rho$ . В этом случае определим взаимосвязь между показателями НДС как для сплошного состояния контура, так и при наличии на нем техногенных трещин разрыва, для чего рассмотрим на основе гео-

метрического анализа прямоугольных треугольников  $O_1AB$  и  $O_1DC$  следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_1 &= \frac{\sigma_p - \sigma_k}{\varepsilon_p - \varepsilon_k} = \frac{\chi_n \rho_p - \chi_k \rho_k}{\varepsilon_p - \varepsilon_k} = E_c; \\ \operatorname{tg} \alpha_2 &= \frac{\sigma_p - \sigma_k}{(\varepsilon_p - \varepsilon_k) + \delta_p} = \frac{\chi_n \rho_p - \chi_k \rho_k}{(\varepsilon_p - \varepsilon_k) + \delta_p} = E_{тр}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $E_c$ ,  $E_{тр}$  – модули упругости материала горной породы в сплошном состоянии и при наличии на контуре шпура трещин, Па;  $\delta_p$  – деформация раскрытия сквозной трещины.

Совместное решение уравнений (16) дает

$$\delta_p = (\varepsilon_p - \varepsilon_k) \left( \frac{E_c}{E_{тр}} - 1 \right) = (\varepsilon_p - \varepsilon_k) k_\delta, \quad (17)$$

где  $k_\delta = \sqrt{2} - 1$ ;  $E_{тр} = \frac{E_c}{\sqrt{2}}$ .

Полученная зависимость (17) является основополагающим деформационным условием квазистатики хрупких материалов, так как отражает взаимосвязь физических констант в сплошном и нарушенном техногенными трещинами состояниях. Физическое значение коэффициента пропорциональности  $k_\delta$  заключается в том, что он отражает изменение (снижение) модуля упругости  $E_c$  сплошного состояния по сравнению с состояниями, в которых зарождаются трещины разрыва и прорастают вплоть до сквозных.

Результаты в форме (11)-(17) позволяют раскрыть зависимость (10) в виде функционально связанных между собой следующих слагаемых:

$$\Xi = \frac{1}{2} \sigma_{раз} \cdot \varepsilon_p + \frac{1}{2} (\sigma_{раз} - \sigma_k) \delta_p + \sigma_k \delta_p. \quad (18)$$

Подстановка в (18) квазистатического деформационного условия (17) приводит к выражению

$$\begin{aligned} \Xi &= \frac{1}{2} \sigma_{раз} \cdot \varepsilon_p (1 + k_\delta) \times \\ &\times \left[ 1 - \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_p} \frac{k_\delta}{(1 + k_\delta)} + \frac{\sigma_k}{\sigma_{раз}} \frac{k_\delta}{(1 + k_\delta)} \left( 1 - \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_p} \right) \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Переход в уравнение (19) от НДС на контуре шпура ( $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ) к распорной нагрузке ( $\rho$ ) произведём с помощью зависимостей (1) и (2), что даёт

$$\Xi = \frac{1}{2} \frac{\rho_p^2}{E} \chi_n (\chi_n + \mu) (1 + k_\delta) \left[ 1 + A_1 \frac{\rho_k}{\rho_p} - A_2 \left( \frac{\rho_k}{\rho_p} \right)^2 \right], \quad (20)$$

где  $A_1 = \left[ \frac{\chi_k}{\chi_n} - \frac{\chi_k + \mu}{\chi_n + \mu} \right] \cdot \frac{k_\delta}{1 + k_\delta}$ ;  $A_2 = \frac{\chi_k}{\chi_n} \cdot \frac{\chi_k + \mu}{\chi_n + \mu} \cdot \frac{k_s}{(1 + k_s)}$ .

С целью упрощения полученной зависимости (20) численно проанализируем слагаемые множителя в квадратных скобках по отношению к единице, для чего рассмотрим случай, когда  $n = 5$ , что даёт  $\chi_n = 26/24 = 1,08$  и согласно (12)  $\rho_k/\rho_p = 0,15$ ,  $(\rho_k/\rho_p)^2 = 0,02$ , при этом принимаем:  $\mu = 0,2$ ;  $\chi_n = 5/3 = 1,67$ ;  $k_\delta = 0,41$ . Конкретный расчет показывает:  $[1 + 0,038 - 0,013] = 0,99$ . Численные результаты дают основание принять множитель в квадратных скобках равным единице, а это существенно упрощает аналитический вид искомой энергетической зависимости:

$$\Theta = \frac{1}{2} \chi_n \cdot (\chi_n + \mu) \cdot (1 + k_\delta) \cdot \frac{\rho_p^2}{E_c} \sqrt{2}. \quad (21)$$

Зависимость (21) определяет минимальное значение удельной объемной энергоёмкости, при которой рассматриваемая единичная отдельность горной породы разрывается на две равные части, так как в этом случае степень дробления также минимальна [11].

#### Результаты исследований и их обсуждение

Логическим завершением данных исследований является сравнение их конечных результатов, полученных в виде зависимости (21) с аналогичным показателем работы [6]:

$$\alpha = \frac{3n^2 + 1}{3(n^2 - 1)} \cdot (1 + \mu) \cdot \frac{\rho_p^2}{E_c}. \quad (22)$$

Относительная аналитическая оценка (21) и (22) показывает, что

$$\frac{\Theta}{\alpha} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \frac{n^2 - 1}{3n^2 + 1} \cdot \frac{(\chi_n + \mu) \cdot (1 + k_\delta) \cdot \chi_n}{1 + \mu}, \quad (23)$$

а численные расчеты при  $\mu = 0,2$  дают:

$$n = 3, \frac{\Theta}{\alpha} = 1,91; n = 4, \frac{\Theta}{\alpha} = 1,15; n = 5, \frac{\Theta}{\alpha} = 1,09;$$

$$n = 6, \frac{\Theta}{\alpha} = 1,07; n = 10, \frac{\Theta}{\alpha} = 1,02.$$

#### Выводы

Разработана и предложена методика инженерных расчетов энергосиловых показателей процесса разрушения крупноблочных отдельностей горной породы посредством одиночного шпура, на контур которого статически воздействует распорное средство. Результаты исследований основаны на теории квазистатического разрушения упругохрупких материалов и включают силовой подход, когда расчетная схема базируется на оценке НДС контура шпура в зависимости от его состояния в процессе возникновения и развития трещин нормального разрыва.

Полученное в данной работе решение сравнивается с аналогичной зависимостью, но определенной ав-

торами на основе энергетического подхода. Сравнение указывает на эквивалентность энергетического и силового подходов при определении показателей процесса разрушения горных пород шпуровым способом, несмотря на существенное различие в постановке рассматриваемой задачи и принятых расчетных схем.

Совместные результаты анализируемых работ, дополняя друг друга с позиции механической и физической теории прочности, представляют собой базовую расчетную модель разрушения горной породы, которая является основополагающей для решения ряда практических статических и динамических задач горного производства, так как включает последние достижения прикладной науки о разрушении квазихрупких материалов.

#### Список источников

1. Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С. Современные технологические схемы добычи блочного высокопрочного камня // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 5-11.
2. Алимов О.Д., Мамасаидов М.Т. Технические средства отделения блоков камня от массива. Фрунзе: Илим, 1987. 216 с.
3. Карасев Ю.Г., Бакка Н.Т. Природный камень. Добыча. Добыча блочного и стенового камня. СПб.: Санкт-Петербургский горный институт, 1997. 428 с.
4. Першин Г.Д., Уляков М.С. Обоснование способов подготовки к выемке блочного природного камня высокой прочности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №4. С. 14-19.
5. Пшеничная Е.Г. Обоснование рациональных параметров технологии добычи гранитных блоков с применением невзрывчатых разрушающих средств: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2006. 167 с.
6. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г. Решение задачи Ляме в квазихрупкой постановке для обоснования модели расчета разрушения горных пород шпуровым способом // Горный журнал. Изв. вузов. 2023. №3. С. 53-63.
7. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г. Концепция квазихрупкого разрушения горных пород применительно к процессам их добычи и первичной переработки // Горный журнал. Изв. вузов. 2022. №4. С. 64-75.
8. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г. Основы расчета технологических параметров добычи природного камня с применением НДС // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. / под ред. Г.Д. Першина. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2001. Вып. 1. С. 77-94.
9. Латышев О.Г. Разрушение горных пород. М.: Теплотехник, 2007. 660 с.
10. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г. Энергетические критерии квазихрупкого разрушения горных пород в технологических процессах их добычи и

первичной переработки // Горная промышленность. 2022. №2. С. 84-89.

11. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г., Северин Е.В. Определение размеров зоны и степени трещинообразования при шпуровой отбойке блочного камня // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. №4. С. 28-32.

### References

1. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S. Modern technological schemes for the extraction of high-strength block stone. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015;(3):5-11. (In Russ.)
2. Alimov O.D., Mamasaidov M.T. *Tekhnicheskie sredstva otdeleniya blokov kamnya ot massiva* [Technical means for separating stone blocks from the massif]. Frunze: Ilim, 1987, 216 p. (In Russ.)
3. Karasev Yu.G. Bakka N.T. *Prirodnyi kamen. Dobycha. Dobycha blochnogo i stenovogo kamnya* [Natural stone. Extraction. Extraction of block and wall stones]. Saint Petersburg: Saint Petersburg Mining Institute, 1997, 428 p. (In Russ.)
4. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Providing a rationale for methods of preparing for the excavation of high-strength natural block stone. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010;(4):14-19. (In Russ.)
5. Pshenichnaya E.G. *Obosnovanie ratsionalnykh parametrov tekhnologii dobychi granitnykh blokov s primeneniem nevzryvchatykh razrushayushchikh sredstv: dis. ... kand. tekhn. Nauk* [Providing a rationale for reasonable parameters of the technology

for extracting granite blocks using non-explosive cracking agents: PhD thesis]. Magnitogorsk, 2006. 167 p.

6. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G. Solution of the Lamé problem in a quasi-brittle formulation to provide a rationale for the model of calculating the destruction of rocks by the blasthole method. *Gornyi zhurnal. Izv. vuzov* [Mining Journal. News of Higher Institutions]. 2023;(3):53-63. (In Russ.)
7. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G. The concept of quasi-brittle fracture of rocks in relation to the processes of their extraction and primary processing. *Gornyi zhurnal. Izv. vuzov* [Mining Journal. News of Higher Institutions]. 2022;(4):64-75. (In Russ.)
8. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G. Basics of calculating technological parameters of natural stone extraction using the stress and strain state. *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnya: sb. nauch. tr.* [Extraction, processing and use of natural stone: collection of papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2001, no. 1, pp.77-94. (In Russ.)
9. Latyshev O.G. *Razrusheniye gornykh porod* [Destruction of rocks]. Moscow: Teplotekhnika, 2007, 660 p. (In Russ.)
10. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G. Energy criteria for quasi-brittle fracture of rocks in technological processes of their extraction and primary processing. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2022;(2):84-89. (In Russ.)
11. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G., Severin E.V. Determining the size of the zone and the degree of cracking during hole breaking of block stone. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2003;(4):28-32. (In Russ.)

Поступила 26.09.2023; принята к публикации 07.02.2024; опубликована 28.03.2024  
Submitted 26/09/2023; revised 07/02/2023; published 28/03/2024

**Першин Геннадий Дальтонович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов, Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

**Пшеничная Елена Геннадьевна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры механики, Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: pshenichnaya\_e@mail.ru.

**Gennady D. Pershin** – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mining Machines and Transport and Technological Complexes, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Elena G. Pshenichnaya** – PhD (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: pshenichnaya\_e@mail.ru.