

УДК 550.34.06, 553.94

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВИБРАЦИИ НА РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦА ГРАНИТА**

Ч. Даджун, Ю. Пен

*Колледж инженерных конструкций, Университет Цзилинь,
130026, г. Чанчунь, Китай*

Изучены закономерности разупрочнения и разрушения гранита под воздействием ультразвуковой вибрации относительно времени с помощью теоретического анализа, метода конечных элементов и экспериментальных исследований. Актуальность данной работы диктуется необходимостью усовершенствования эффекта дробления горной породы и обеспечения теоретического сопровождения применения ультразвуковых вибраторов при бурении твердых пород и разработке методов ультразвукового вибрационного бурения. Метод конечных элементов использован в качестве теоретического сопровождения экспериментальной части исследований для создания практической модели неоднородной горной породы, анализа эволюции трещин в различные временные периоды и определения порога продолжительности ультразвуковой вибрации. Пористость и прочность образцов горной породы оценивались с привлечением метода ядерного магнитного резонанса и измерения поствибрационной прочности при одноосном сжатии. Выполнен анализ влияния продолжительности вибрационного воздействия на разрушение горной породы.

Продолжительность ультразвукового воздействия, гранит, разрушение горной породы, временной порог

DOI: 10.15372/FTPRPI20180506

С увеличением глубины геологической разведки возрастает влияние свойств твердых горных пород на ее эффективность и стоимость. В настоящее время для разрушения твердых горных пород наиболее часто применяют метод ударного вращательного бурения с низкой частотой вибрации (14 Гц) и неявным разупрочнением горной породы [1, 2]. В мировой практике бурения для разрушения горной породы используются несколько видов вибрационного ударного воздействия: единичное, низкочастотное (12 – 16 Гц) и акустическое (70 – 150 Гц). Механизм разрушения породы методом акустической вибрации (< 150 Гц) состоит в том, что параметры силы вибрации, генерируемой вибратором в данном частотном диапазоне, соответствуют собственной частоте колебаний бурильной колонны. Это вызывает силу возбуждения, которая передается буру, обеспечивающему усталостный разрыв горной породы. Согласно данным модельного анализа и экспериментальным данным, частота собственных колебаний горной породы больше 20 кГц. В этом диапазоне сила возбуждения, имеющая ультразвуковую частоту, вызывает резонансный эффект в горной породе, что приводит к формированию резонансно-усталостной трещины. Большая площадь дезинтеграции существенно усиливает эффективность дробления породы и благоприятно сказывается на сроке службы бура. Продолжитель-

ность воздействия ударной силы при использовании ультразвуковой вибрации (20 кГц) очень мала, а мгновенное контактное напряжение в породе велико, что обеспечивает более высокую эффективность ультразвуковой вибрации по сравнению с традиционными методами дробления горных пород [3, 4]. Очевидна целесообразность изучения влияния продолжительности ультразвукового вибрационного воздействия на эффективность дробления горных пород в случае применения вибрации ультразвуковой частоты [5, 6].

Согласно экспериментальным результатам, в процессе разрушения гранита при воздействии ультразвуковой вибрации можно выделить четыре стадии: накопление повреждений, распространение трещин, устойчивое развитие процесса, мгновенное разрушение. Временной порог ультразвукового вибрационного воздействия составляет 15–20 мин, а оптимальная продолжительность вибрационного интервала равна 15–25 мин.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Горная порода — сложный технический материал с исходными дефектами в виде повреждений. Кристаллы горной породы являются механически гетерогенными из-за содержания разных минералов. Разрушение кристалла развивается вдоль самой слабой поверхности раздела или по кристаллу с низкими механическими свойствами ввиду наличия трещин и ослабленных плоскостей [7, 8]. Когда статическое напряжение гранита достигает предела прочности σ_c , хрупкая порода моментально растрескивается; при $\sigma < \sigma_c$ порода имеет запас прочности под действием статической нагрузки. В случае циклического воздействия напряжений внутренняя дезинтеграция горной породы накапливается и порода разрушается по достижении критического значения [9, 10]. Согласно теоретическому анализу, трещина случайным образом развивается внутри породы [11].

В настоящей работе неоднородность материала описывается с помощью вероятностного метода и закона распределения экстремальных значений прочности по экспоненциальному закону. Метод конечных элементов применяется в сочетании со статистическим для характеристики сложного механического поведения микрообъекта. Модуль упругости всех объектов подчиняется распределению Гаусса, моделируя таким образом гетерогенность горных пород [12]. Распределение вычисляется на основе функции плотности вероятности, которая позволяет построить трехмерную модель неоднородной горной породы:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < +\infty, \quad (1)$$

где $f(x)$ — вероятность того, что модуль упругости равен данному значению; $\mu = 55$ ГПа — среднее значение модуля упругости; σ^2 — коэффициент неоднородности горной породы: чем ниже σ , тем однороднее горная порода, чем выше σ , тем менее однородна горная порода.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование методом конечных элементов применимо для разработки теории трещин при разрушении хрупкого материала. Концентрация напряжений формируется в вершине трещины внутри материала, испытывающего внешнюю нагрузку. Когда в районе вершины трещины достигается максимальное значение растягивающего напряжения, концентрация локального напряжения приводит к потере устойчивости трещины [13]. При этом рост трещины будет ускоряться в направлении максимального главного напряжения даже без увеличения нагрузки [14]. В районе вершины трещина будет распространяться с образованием вторичных трещин, которые при слиянии образуют более крупные трещины, влияющие на конечную прочность горной породы [15].

Создание модели неоднородной горной породы. Комбинация статического метода и метода конечных элементов используется для построения трехмерной модели горной породы при ультразвуковом вибрационном воздействии, генерирующем синусоидальную вибрацию амплитудой 40 мкм и частотой 20 кГц. Также принималось во внимание статическое напряжение 300 Н на поверхности гранита [16] с целью введения понятия “скорость разрушения” для анализа влияния продолжительности вибрации на эволюцию трещины в горной породе и ее разрушение. Размер модели 40 × 80 мм. Образцы горных пород состоят из элементов с гетерогенными механическими характеристиками, природными трещинами и пустотами. Нижний торец образца породы зафиксирован, а образец разбит на 12 902 трехмерных треугольных элемента. К верхнему торцу модели образца горной породы приложена равномерно распределенная синусоидальная нагрузка $p(x)$. Для моделирования взята четверть от образца, изображенного на рис. 1а. Коэффициент Пуассона и плотность горной породы равны 0.2 и 2950 кг/м³ соответственно.

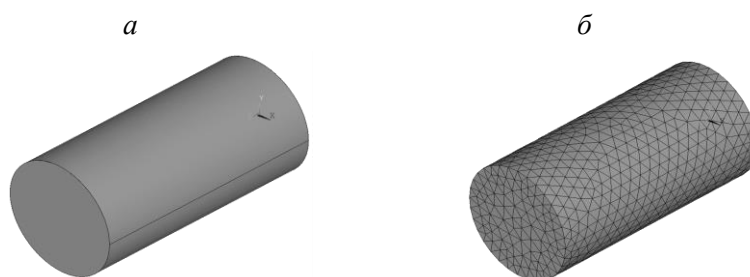


Рис. 1. Модель неоднородной горной породы (а) и механические свойства элементов модели (б)

Для лучшей имитации гетерогенности горной породы число дискретных элементов должно быть максимально большим, а каждый элемент образца иметь различные механические свойства (рис. 1б). Следовательно, при условии равномерной нагрузки любой элемент в модели удовлетворяет деформации максимального удлинения согласно второй теории прочности; степень разрушения элемента модели горной породы также различна согласно этому же критерию разрушения [17, 18].

Анализ результатов моделирования. Трехмерная модель неоднородной горной породы представлена на рис. 2, трещина в породе появляется в интервале 0–35 мин при ультразвуковой частоте 20 кГц, амплитуде 40 мкм и статическом давлении 300 Н. На рис. 3 показаны рост трещины в двухмерной модели неоднородной горной породы и анализ поперечного сечения модели.

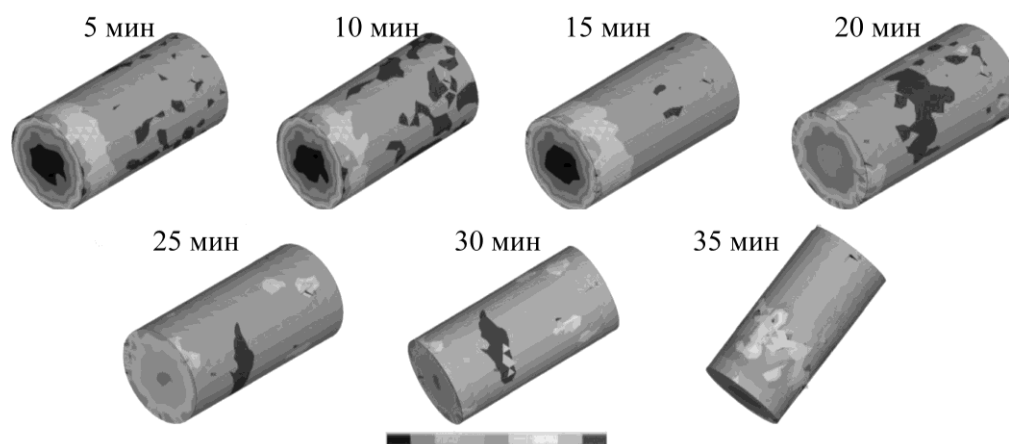


Рис. 2. Схема разрушения трехмерной модели горной породы при разной продолжительности вибрационного воздействия

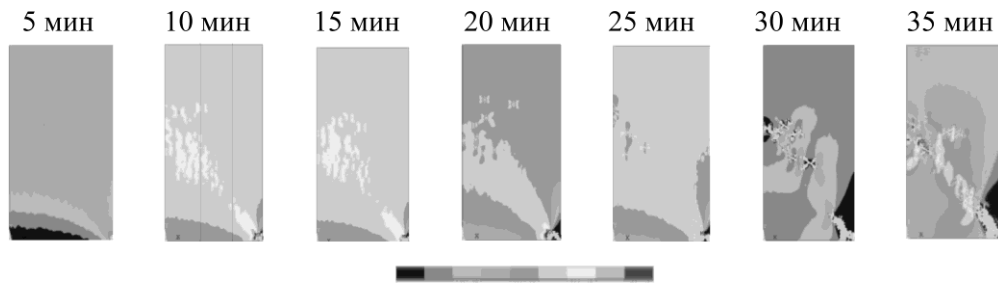


Рис. 3. Схема разрушения двухмерной модели горной породы при разной продолжительности вибрационного воздействия

Функция распределения Гаусса введена в процесс ультразвукового дробления породы в качестве теоретической основы численного моделирования для сопоставления образца горной породы и модели разрушения относительно продолжительности вибрации в экспериментальных условиях на рис. 2.

Сделан вывод, что начальная трещина в горной породе инициируется в элементе с низкими по величине механическими свойствами. Эволюция начальной трещины в граните при ультразвуковом вибрационном воздействии включает четыре стадии.

Первая стадия — аккумуляция (5–10 мин), исходные внутренние трещины в породе расширяются в поперечном направлении с концентрацией напряжения в вершине.

Вторая стадия — расширение (15–20 мин), продолжительность ультразвукового вибрационного воздействия превышает временной порог (15–20 мин). В горной породе наблюдается разрушение элементов модели и появление серой площадки на торце. Одновременно энергия, поглощенная горной породой, используется для инициации и разрушения трещин. Скорость разрушения неповрежденной модели достигает максимума в течение 20 мин. Микропоры непрерывно расширяются с формированием магистральной трещины в определенном направлении и сопутствующим произвольным распределением вторичных трещин на ней.

Третья стадия — стабилизация (25 мин), эффективность трещинообразования в горной породе спустя 25 мин снижается и рост трещин прекращается.

Четвертая стадия — рывок (30 мин), разрушение, инициируемое ультразвуковым вибрационным воздействием, развивается с формированием пересекающихся между собой мезодефектов и образованием обширного участка трещин произвольной формы.

Анализ имитационных разрушений. Макроскопические трещины в породе, достигающие критических размеров, инициируют накопление дефектов в породе на ранней стадии. Развитие трещиноватости сказывается на механических свойствах породы и значительно снижает ее прочность [19]. Разрушение — процесс деградации, вызванный микроскопическими дефектами под действием внешней нагрузки и влиянием окружающей среды [20]. В механике микроскопического повреждения введено понятие “скорость разрушения” для описания эволюции микроскопических дефектов: микропор и микротрещин внутри породы. На примере трехмерной модели можно сделать предположение, что основной механизм снижения прочности материала происходит за счет уменьшения эффективной опорной площади под воздействием дефектов. Когда относительная площадь, которую выдерживает внутренняя сила, сокращается, действующие напряжение и деформация возрастают; при этом можно определить коэффициент разрушения D :

$$D_n = \frac{(A_{n-1} - A_n)}{A_0}, \quad (2)$$

где D_n — скорость трещинообразования в граните на единицу времени ($n - 1, n$), которая представляет собой параметр разрушения; A_0 — исходная опорная площадь образца; A_{n-1} — остаточная площадь модели после вибрационного воздействия в течение времени $n - 1$; A_n — остаточная площадь модели после вибрационного воздействия в течение времени n ; $A_{n-1} - A_n$ — площадь разрушения модели в течение периода времени ($n - 1, n$).

В процессе распространения трещин разрушение прогрессирует со временем, скорость распространения трещин в модели горной породы за единицу времени показана на рис. 4. Согласно прогнозу, полученному методом конечных элементов, оптимальное время воздействия составляет 15–25 мин, при этом ультразвуковая вибрация в этом диапазоне способна ускорить разрушение горной породы. Существует временной порог, равный 15–25 мин вибрационного воздействия на горную породу: при $t_{\text{порог}} < t < 30$ разрушение гранита ускоряется; при времени воздействия 20 мин достигается критическая точка и при $20 < t < 30$ прослеживается тенденция замедления разрушения горной породы.

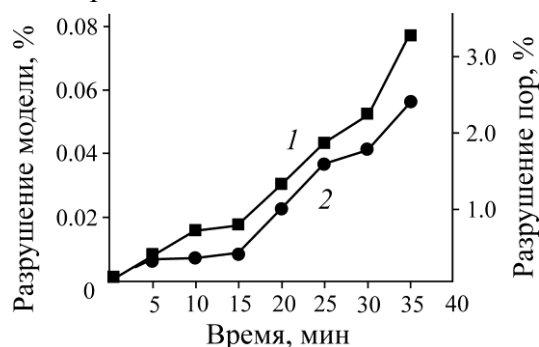


Рис. 4. Гауссовская кривая разрушения модели горной породы (1) и кривая повреждения пор с течением времени (2)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Экспериментальные гранитные образцы, выбуренные на месторождении Цзилинь, провинция Цзилинь, имели цилиндрическую форму размером 40×80 мм при соотношении 2:1. Для обеспечения идентичности пробы взяты с одного образца гранита. Образцы А–Н с хорошими характеристиками монолитности и распределения внутренних трещин отобраны на основе магниторезонансного исследования распределения пористости исходной горной породы (рис. 5).

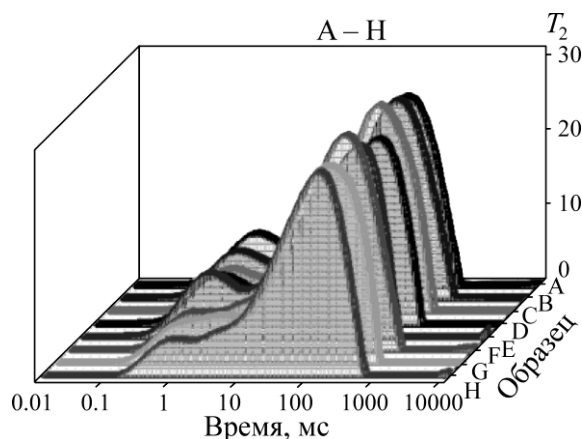


Рис. 5. Карта распределения магнитного резонанса для образцов гранита

Согласно теории ядерного магнитного резонанса (ЯМР), размер пор в горной породе можно определить по распределению времени поперечной релаксации: чем меньше размер пор, тем меньше значение T_2 ; чем больше размер пор, тем выше T_2 . Распределение кривой ЯМР-изображения отражает общее распределение порового объема. Спектр распределения ядерного магнитного резонанса T_2 для гранита в исходном состоянии представлен тремя пиками. Разность между первым и вторым пиком больше, в то время как изображение третьего пика нечеткое. Пики интенсивности ЯМР-сигнала для горной породы имеют незначительные различия, поскольку образцы взяты на одной глубине в одном массиве; распределение микропористости внутри образца приблизительно равномерное.

Восемь образцов гранита маркировали от А до Н и рассматривали как группу повторного использования при некотором различии между отдельными образцами; построена кривая разрушения для группы идентичных образцов породы. В ходе эксперимента образцы до вибрационного воздействия насыщали вакуумом в течение 24 ч под давлением 2.5 МПа для лучшего насыщения водой внутренних трещин в образцах породы. Затем исходные образцы породы использовали для эксперимента с ядерным магнитным резонансом.

Вторая стадия ультразвуковой вибрации продолжалась в течение 5 мин на специальной установке ультразвуковой вибронагрузки для образцов горной породы (рис. 6). Стадии насыщения ядерного магнетизма вибрации повторяли для остальных 7 образцов (получено 7 групп экспериментальных данных при продолжительности эксперимента 0–35 мин).

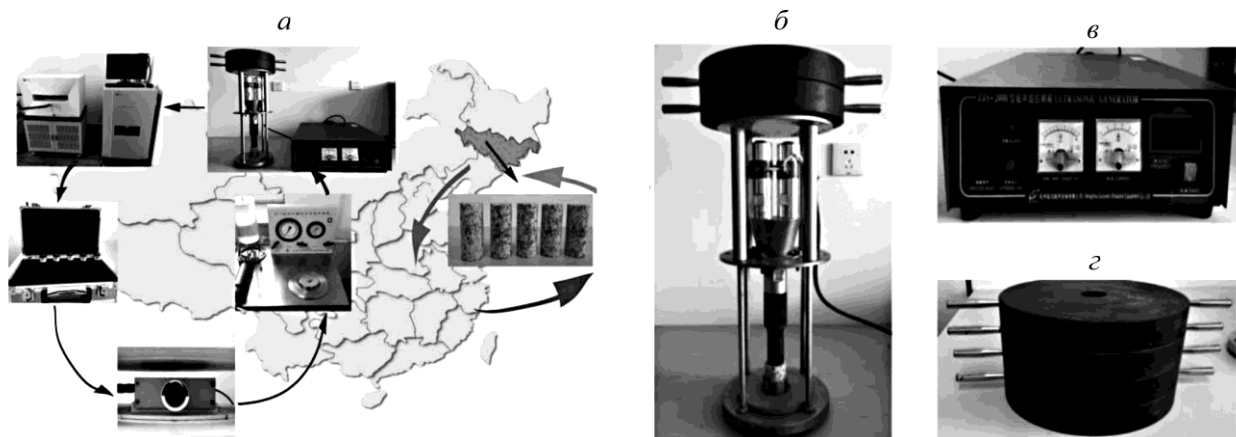


Рис. 6. Установка для дробления горной породы с применением ультразвуковой вибрации (а); устройство для нагружения с приложением ультразвуковой вибрации (б); источник питания ультразвуковой вибрации (в); пригрузки для ультразвукового нагружающего устройства (г)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно экспериментальным результатам, испытания с применением ультразвуковой вибрации различной продолжительности вызывают существенные изменения в пористой структуре гранита. Поскольку спектр T_2 , распределение пористости и размер пор подобны для всех экспериментальных образцов гранита, для анализа выбран образец А.

Анализ участка спектра T_2 . Применение ЯМР может обеспечить качественное, количественное определение и анализ пор в граните в достаточно широком диапазоне за короткий промежуток времени и с малым разрушением образцов породы. ЯМР идентифицирует размер пор внутри гранита через детектирование протоков воды в порах образца. Зависимость между временем поперечной релаксации T_2 и удельной площадью поверхности пор в граните имеет вид

$$\frac{1}{T_2} = P \frac{S}{V}. \quad (3)$$

Радиус пор пропорционален радиусу просвета поры, и формула (3) может быть упрощена:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{P}{r} F_s, \quad (4)$$

где S — площадь поверхности пор; V — объем пор; P — сила поперечной релаксации поверхности; F_s — коэффициент геометрической формы; r — радиус поры.

Существует соответствие между кривой распределения T_2 и распределением размера пор в угольном образце: чем больше T_2 , тем больше радиус, чем выше амплитуда T_2 , тем большее число пор соответствующего размера. Кривые распределения T_2 для гранита в интервале 0–35 мин после ультразвуковой вибрации, полученные на основании измерений, приведены на рис. 7.

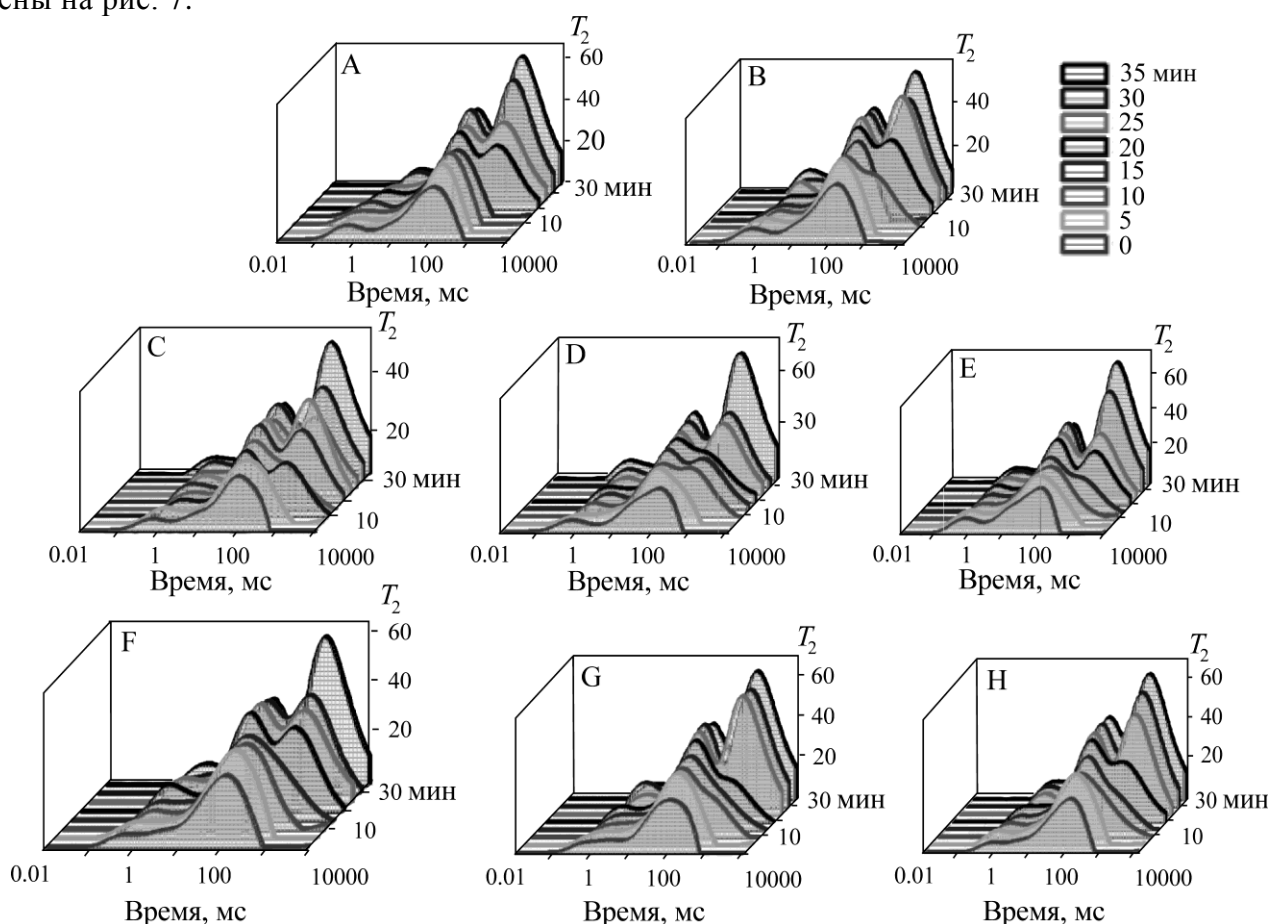


Рис. 7. Кривые распределения T_2 для стандартных образцов породы А–Н при различной продолжительности вибрационного воздействия

Анализ распределения размеров пор. Ультразвуковая вибрация может изменять размер, число и характер распределения пор в граните, влияя таким образом на процесс его дробления. Можно выделить три типа нарушенной структуры пор в граните: микропоры (< 10 нм, представляющие объем адсорбции в граните и пространство капиллярной конденсации), мезопоры (10–1000 нм, представляющие площадь медленной ламинарной инфильтрации) и макропоры (> 1000 нм, пред-

ставляющие площадь сильной ламинарной инфильтрации). Согласно корреляции, зависимость между радиусом пор r и временем поперечной релаксации T_2 для породного образца можно упростить:

$$r = T_2 \cdot 10^{-8}. \quad (5)$$

По формуле (5) кривую распределения продолжительности поперечной релаксации T_2 для гранита можно преобразовать в кривую распределения радиуса пор. Кривые распределения размера пор для гранита А в исходном насыщенном состоянии в моменты 0 и 35 мин показаны на рис. 8.

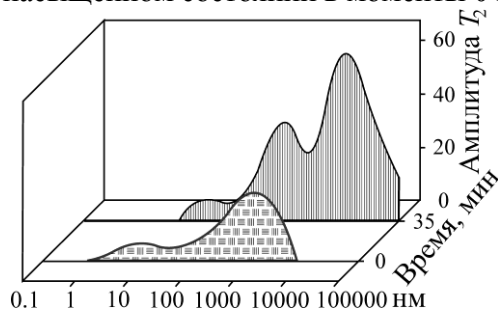


Рис. 8. Кривые распределения времени релаксации T_2 и размера пор для гранита после вибрационного воздействия (<10 нм — микропоры; 10–100 нм — мезопоры; >1000 нм — макропоры)

В табл. 1 представлены данные пористости породных образцов до и после вибрации. С помощью экспоненциальной функции (рис. 9) получена зависимость между пористостью и продолжительностью ультразвукового вибрационного воздействия на породу:

$$y = y_0 + Ae^{-x/t}, \quad y_0 = 0.01698, \quad A = 0.38818, \quad t = -21.30511,$$

где y — пористость, %; x — продолжительность ультразвукового вибрационного воздействия, мин.

ТАБЛИЦА 1. Пористость образцов горной породы до и после вибрационного воздействия, %

Время, мин	Индекс образца								Среднее
	А	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	
0	0.477	0.507	0.513	0.478	0.529	0.549	0.519	0.482	0.50675
5	0.598	0.671	0.728	0.672	0.680	0.719	0.730	0.722	0.69
10	0.695	0.972	0.971	0.922	0.774	0.838	0.843	0.865	0.86
15	0.712	0.948	0.894	1.067	0.843	0.935	0.893	0.885	0.897125
20	1.245	1.262	1.226	1.097	1.119	1.242	0.986	1.255	1.179
25	1.349	1.560	1.402	1.327	1.315	1.427	1.721	1.654	1.469375
30	1.752	1.738	1.522	1.391	1.702	1.461	1.888	1.874	1.666
35	2.181	1.938	2.295	2.215	2.518	2.006	2.271	2.303	2.215875

Пропитка в вакууме под давлением адаптирована для насыщения жидкостью внутренних пор горной породы. Согласно спектральной площади, на кривой T_2 следует отметить, что указанная площадь прямо пропорциональна количеству жидкости, содержащейся в водонасыщенной горной породе (другими словами, особая область связана с пористостью горной породы). Размер спектральной области различных пиков соответствует интегралу площади соответствующих пиков в микропоре, мезопоре и макропоре водонасыщенных горных пород т. е. размер спектральной площади первого, второго и третьего пиков прямо пропорционален общему количеству микропор, мезопор и макропор соответственно. После 0–35 мин ультразвуковой вибрационной обработки процессы эволюции и разрушения пор в образце горной

породы можно оценить через изменения в отношении первого, второго и третьего спектральных площадей к общей спектральной площади на кривой T_2 . Кривые процентного суммирования спектрального участка показаны на рис. 10.

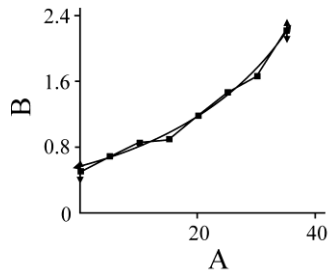


Рис. 9. Кривая аппроксимирующей экспоненциальной функции $y(x)$, B — пористость, %; A — продолжительность вибрации, мин

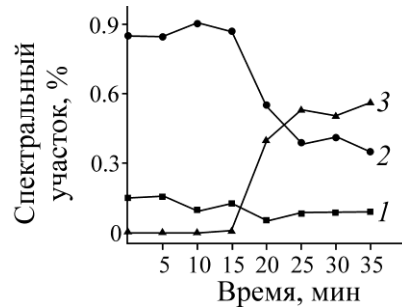


Рис. 10. Изменение спектрального участка спектральной площади для образца гранита относительно продолжительности вибрационного воздействия: 1 — микропоры; 2 — мезопоры; 3 — макропоры

На основе статистических данных для кривой распределения размера пор получены изменения в распределении и соотношении различных пор после 0–35 мин ультразвукового вибрационного воздействия (рис. 11) в виде процентной суммарной столбчатой диаграммы пористости. Структуру разрушения пор в граните можно разделить на три категории: микропоры — 1 (< 10 нм), мезопоры — 2 ($10 \sim 1000$ нм) и макропоры — с 3–5 (> 1000 нм) (рис. 11).

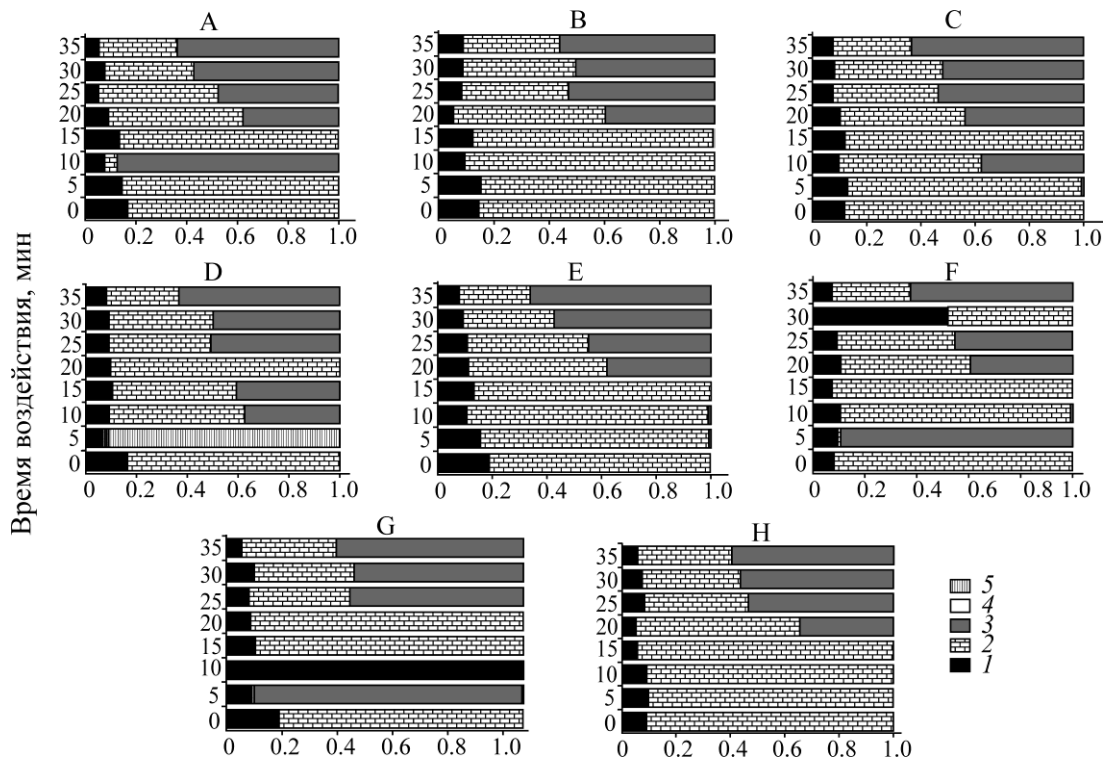


Рис. 11. Диаграмма процентного накопления пористости в образцах А–Н

С ростом продолжительности вибровоздействия соотношение пор различных диаметров изменяется. По сравнению с исходным состоянием, число макропор явно возрастает. Различные образцы гранита демонстрируют хорошее соответствие в спектре T_2 , пористости, распределении размера пор. Так, соотношение макропор равно –0.1, –0.1, 0.4, 39.6, 52.9, 50.2 и 56.1 % после

ультразвуковой вибрации в течение 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 мин соответственно. Рост числа мезопор всегда увеличивается после вибрационного воздействия, при этом соотношение мезопор в процессе вибрации составляет -0.6, 5.1, 1.8, -30.2, -46.4, -44.1 и -50.2 %, подтверждая положение, что при скоростной трансформации мезопор (10–1000 нм) в макропоры (> 1000 нм) в процессе разрушающего трещинообразования (временной порог 15–20 мин) прочность породы на сжатие резко снижается, однако изменения в соотношении миллипор и микропор незначительны при отрицательной амплитуде. Следующие данные указывают на то, что для гранита характерно большое число миллипор и микропор и малое число мезопор и макропор. С ростом продолжительности вибрационного воздействия комплексное влияние напряжения ультразвуковой вибрации и статико-динамической нагрузки способствует расширению пор, их слиянию и полной трансформации миллипор и микропор в мезопоры и макропоры при существенном росте числа последних. В критической точке при трансформации мезопор (10–1000 нм) в макропоры (> 1000 нм) эффективность процесса дробления породы ощутимо возрастает.

Изменения прочности породы на сжатие относительно продолжительности ультразвукового вибрационного воздействия приведены в табл. 2. На основе экспоненциальной функциональной зависимости выведена регрессионная функция разрушения горной породы, в которой продолжительность ультразвукового вибрационного воздействия взята как переменная, а прочность на сжатие — как целевая величина:

$$y = y_0 + Ae^{-\frac{(x-x_e)}{2w^2}}, \quad Y_0 = 97.1247, \quad x_c = 31.45641, \quad w = 14.32289, \quad A = -66.17057, \quad 0 \leq x \leq 30.$$

ТАБЛИЦА 2. Изменение прочности горной породы на сжатие относительно продолжительности ультразвукового вибрационного воздействия, МПа

Номер группы	Прочность на сжатие	Средняя прочность	Номер группы	Прочность на сжатие	Средняя прочность
0–1	96.93283	91.610796	20–1	43.32903	44.136378
0–2	89.26937		20–2	54.91426	
0–3	95.48		20–3	47.68854	
0–4	84.21178		20–4	25.6775	
0–5	92.16		20–5	49.07256	
5–1	85.47137	84.307702	25–1	42.99327	40.310512
5–2	79.08114		25–2	39.14739	
5–3	80.37		25–3	38.9885	
5–4	92.67		25–4	37.8576	
5–5	83.946		25–5	42.5658	
10–1	68.6565	74.78116	30–1	15.404455	30.555398
10–2	85.20856		30–2	37.23222	
10–3	78.09415		30–3	32.0587552	
10–4	72.84		30–4	28.009	
10–5	69.13137		30–5	40.07256	
15–1	77.95351	66.810818			
15–2	59.28638				
15–3	75.73382				
15–4	62.70859				
15–5	58.37179				

Значение прочности на сжатие изменяется в пяти образцах горной породы в каждой группе (всего 7 групп) в течение 0–35 мин ультразвукового вибрационного воздействия (рис. 12). С ростом продолжительности действия ультразвуковая вибрация вызывает необратимое раз-

рушение образца горной породы, расширяет внутренние поры и трещины образца, резко повышает пористость. Внутреннее разрушение образца напрямую влияет на его прочность на сжатие: кривая 1 отвечает за снижение прочности породы на сжатие при 0–30 мин вибрационного воздействия; кривая 2 — за повышение пористости породного образца при 0–30 мин воздействия (рис. 12). Скорость порообразования в породном образце при 15–25 мин ультразвукового вибрационном воздействии самая высокая; подобная тенденция характерна для скорости падения прочности на сжатие (рис. 13).

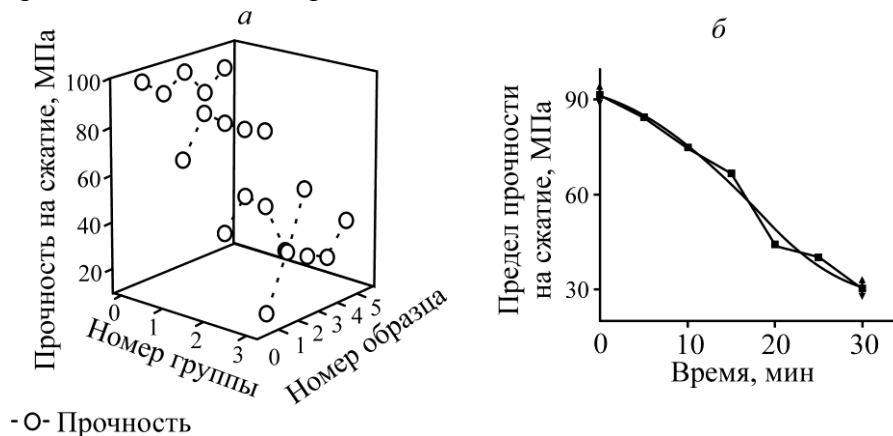


Рис. 12. Графические данные по изменению прочности на сжатие образцов горной породы в зависимости от их номера и группы (а); относительно продолжительности вибрационного воздействия (б)

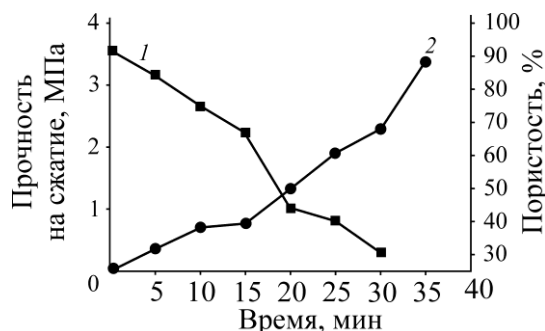


Рис. 13. Зависимость прочности на сжатие (1) и пористости (2) образцов от времени

При частоте вибрации 20 кГц и силе вибрации 300 Н получены диаграммы T_2 для А–Н породных образцов до и после вибрационного воздействия, приведены кривые пористости после вибрации и соответствующие кривые прочности образцов на сжатие. Можно выделить четыре стадии процесса разрушения гранита после ультразвукового вибрационного воздействия.

Первая стадия — накопление разрушения (0–15 мин) (рис. 7, образцы А, В, С). ЯМР-графики А–Н породных образцов в течение 0–15 мин показывают незначительное изменение двух пиков и увеличение времени длительной релаксации; кривая пористости образца после вибрации медленно растет, энергия вибрации идет на внутреннюю начальную аккумуляцию разрушения в горной породе при постепенном увеличении суммарной пористости. В этом временном интервале влияние вибрации на внутренние трещины в основном концентрируется на поверхности горной породы или ее малоглубинной части.

Вторая стадия — расширение трещин (15–20 мин) (рис. 7, образцы С, D). ЯМР-графики в интервале 15–20 мин демонстрируют сдвиг вправо суммарного времени релаксации при возрастании второго пика; кривая суммарной пористости быстро возрастает, т. е. после ста-

дии аккумуляции разрушения в образце горной породы энергия ультразвукового воздействия используется для роста трещиноватости, в частности роста малых трещин. При низкой частоте и малом напряжении микротрещины в горной породе быстро достигают уровня критического трещинообразования; начальное разрушение породного образца усиливается с формированием микротрещин на ранее нетрещиноватых участках. При этом резко снижается прочность горной породы.

Третья стадия — стабильное развитие (20–25 мин) (рис. 7, Е, F). ЯМР-графики в интервале 20–25 мин показывают появление третьего пика. Рост скорости пика замедляется, а пролонгация ультразвуковой вибрации способствует усилению эффекта дробления горной породы, но при постепенном повышении амплитуды. В процессе дробления трещины расширяются равномерно относительно времени, с аккумуляцией разрушения. На этой стадии происходит непрерывное расширение и рост числа микротрещин. Имеющиеся микротрещины эволюционируют и превращаются в трещины среднего размера при четкой тенденции стабильного роста суммарной пористости. Суммарная скорость трещинообразования невысокая; прочность горной породы продолжает стабильно снижаться относительно продолжительности ультразвукового вибрационного воздействия.

Четвертая стадия — мгновенное разрушение (25–30 мин) (см. рис. 7 образцы F, G). ЯМР-графики распределения T_2 в интервале 25–35 мин указывают на дальнейшее расширение четвертого пика. Трещины среднего размера увеличиваются до крупных со скоростью ниже, чем в интервале 15–20 мин. Со временем эффективность трансмиссии энергии ультразвуковой вибрации возрастает, что приводит к появлению усталостных трещин в горной породе и повышению скорости их распространения. В этом интервале средние трещины простираются со слиянием внутренних трещин и формированием трещин макроскопического размера. Пористость существенно повышается, а скорость снижения прочности горной породы увеличивается.

ВЫВОДЫ

На основании теории усталостного дробления, использования коэффициента разрушения и теории Гриффитса выполнен теоретический анализ влияния продолжительности ультразвуковой вибрации на процесс разрушения гранита. Выявлен механизм разрушения горной породы под ультразвуковым вибрационным воздействием. Воздействие ультразвуковой вибрации усиливается продолжительностью ультразвукового вибрационного воздействия, а минимальный временной порог существует при усталостном дроблении. Только в случае, когда продолжительность ультразвуковой вибрации выше минимального временного порога, энергия нагрузки способна вызвать распространение и слияние микротрещин; внутреннее разрушение накапливается в горной породе и в том случае, когда эта величина ниже временного порога. Энергия ультразвуковой вибрации способствует развитию разрушения в граните.

Статистический метод был использован для микроскопических исследований моделирования процесса ультразвукового дробления горной породы. С помощью программы ANSYS построена модель разрушения для прогноза оптимальной продолжительности и временного порога вибрации. Согласно результатам моделирования, воздействие ультразвуковой вибрации на дробление горной породы усиливается со временем. Когда продолжительность ультразвуковой вибрации достигает 15–20 мин, в модели неоднородной горной породы происходит разрушение на торце образца. Существует оптимальная продолжительность ультразвуковой вибрации 15–25 мин; в этом оптимальном интервале ультразвуковая вибрация ускоряет разрушение горной породы.

В ЯМР-экспериментах и в экспериментах по оценке прочности при одноосном сжатии на идентичной группе образцов гранита получены следующие результаты: существует порог продолжительности вибрации (15–20 мин), при котором горная порода вступает в стадию быстрого развития трещин. Можно выделить четыре стадии на кривой поствибрационного разрушения гранита: первая — аккумуляция разрушения (0–15 мин), распространение трещин (15–20 мин), стабильное развитие (20–25 мин), мгновенное разрушение (25–30 мин).

Площади первого и второго пиков интенсивности ЯМР исходного образца гранита доминируют, площадь третьего пика самая маленькая. В процессе вибрационного воздействия уменьшается площадь первого пика для гранита и размер малых пор, площади второго и третьего пиков увеличиваются, т. е. размер крупных пор растет. С ростом продолжительности вибрационного воздействия поры постепенно расширяются и сливаются; количество микропор снижается при росте количества макропор. После 15–20 мин ультразвукового вибрационного воздействия степень разрушения гранита увеличивается, что можно рассматривать как благоприятный фактор для процесса дробления горной породы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Songyu Yin, Dajun Zhao, and Guobing Zhai.** Investigation into the characteristics of rock damage caused by ultrasonic vibration, *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci.*, 2016, 84. — P. 159–164.
2. **Zhang C., Zhang Y. J., and Li Z. W.** Experimental study of seepage characteristics of single rock fracture based on stress states and stress history, *Global Geology*, 2016, 19 (3). — P. 1–5.
3. **Roussy R.** The Development of sonic of drilling technology, *Geodrilling Int.*, 2002, 10. — P. 12–14.
4. **Oothoudt T.** Sonic drilling, an environmental imperative, *Geodrilling Int.*, 1998, 2. — P. 14–16.
5. **Bagde M. N. and Petros V.** Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2005, 42 (2). — P. 237–250.
6. **Manoj N. Bagde and Vladimir Petros** Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2009, 46 (1). — P. 200–209.
7. **Zhong J. H., et al.** Macro-fracture mode and micro-fracture mechanism of shale, *Pet Explor Dev*, 2015, 42. — P. 269–276.
8. **Nikolic M. and Ibrahimbegovic A.** Rock mechanics model capable of representing initial heterogeneities and full set of 3D failure mechanisms, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015. — P. 209–227.
9. **Atalah A.** Effect of rock trenching vibrations on nearby structures, *J. Constr. Eng. Manag.*, 2008, 134. — P. 234–241.
10. **Xu G. Y. and Yan C. B.** Numerical simulation for influence of excavation and blasting vibration on stability of mined-out area, *J. Cent. South. Univ. Tech.*, 2006, 13. — P. 577–583.
11. **Weibull W. A.** Statistical theory of the strength of materials, *Proc. of Royal Swedish Institute Engineering Researching*, Stockholm, [s.n.], 1939. — P. 1–50.
12. **Bonkob C.** Statistical strength theory, Translated by Wu Xuelin. Beijing: Science Press, 1965.
13. **Cho S. H., Ogata Y., and Kaneko K.** Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2003, 40 (5). — P. 763–777.
14. **Davison L. and Stevens A. L.** Continuum measures of spall damage, *J. of Applied Physics*, 1972, 43 (3). — P. 988–994.
15. **Hudson J. A. and Fairhurst C.** Tensile strength weibull's theory and a general statistical approach to rock failure, *Proc. of Civil Engineering Materials Conf.*, Southampton: Structure, Solid Mechanics and Engineering Design, 1969. — P. 901–904.

- 16. Song J. H., Wang H., and Belytschko T.** A comparative study on finite element methods for dynamic fracture, *Computational Mechanics*, 2008, 42 (2). — P. 239–250.
- 17. Armero F. and Linder C.** Numerical simulation of dynamic fracture using finite elements with embedded discontinuities, *Int. J. of Fracture*, 2009, 160 (2). — P. 119–141.
- 18. Tay T. E., Tan V. B. C., and Deng M.** Element-failure concepts for dynamic fracture and delamination in low-velocity impact of composites, *Int. J. of Solids and Structures*, 2003, 40 (3) . — P. 555–571.
- 19. Cho S. H., Ogata Y., and Kaneko K.** Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2003, 40 (5) . — P. 763–777.
- 20. Bazant Z. P., Caner F. C., Carol I., et al.** Microplane model M4 for concrete, I, Formulation with work-conjugate deviatoric stress, *J. of Eng. Mech.*, 2000, 126 (9). — P. 944–953.

Поступила в редакцию 28/III 2018