

## SECTION 7. Mechanics and machine construction.

## FRAC PERFORMANCE EVALUATION OF SIMULATION OF BRITTLE ROCKS ON TESTING SAMPLES AND MODELS

**Abstract:** A comparative analysis of the results of mathematical modeling of crack mono boundary element method and experimental research on crack rock samples to create internal pressure at the crack of a pre-filled with water. An estimate of the reliability calculation indexes simulation that allows you to adjust the parameters of the actual implementation of hydraulic fracturing in brittle rocks.

**Key words:** modeling, fracture zone, the free surface parameters, crack, pressure.

**Language:** Russian

**Citation:** Stovpnik SN (2015) FRAC PERFORMANCE EVALUATION OF SIMULATION OF BRITTLE ROCKS ON TESTING SAMPLES AND MODELS. ISJ Theoretical & Applied Science 10 (30): 58-64.

**Soi:** <http://s-o-i.org/1.1/TAS-10-30-15> **Doi:**  <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2015.10.30.15>

### ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА ХРУПКИХ ПОРОД ПО ИСПЫТАНИЯМ ОБРАЗЦОВ И МОДЕЛЕЙ

**Аннотация:** Выполнен сравнительный анализ результатов математического моделирования развития монотрецины методом граничных элементов и экспериментальных исследований трещинообразования на образцах горных пород при создании внутреннего давления в трещине с предварительным заполнением водой. Получена оценка достоверности расчетных показателей моделирования, что позволяет корректировать фактические параметры выполнения гидроразрыва в хрупких породах.

**Ключевые слова:** моделирование, зона разрушения, свободная поверхность, параметры, трещина, давление.

#### Введение

Известные методы раскола горных пород основаны на создании трещины силовым воздействием на породную поверхность. Для хрупких пород зарождение трещины начинается в местах концентраций микро- и макротрещин или дефектов структуры при превышении предела прочности.

Наиболее сложным для практики является прогнозирование возможного разрушения пород как по направлению, так и величин получаемой трещиноватости.

#### Цель исследования

Провести оценку достоверности математического моделирования гидроразрыва горных пород при разрушении созданием монотрецины.

#### Результаты исследований

Для масштабного раскола горных пород необходимо создать поверхность в виде протяженной монотрецины, формирование которой происходит под действием растягивающих напряжений, направленных перпендикулярно плоскости создаваемой поверхности. Эти условия рассматриваются в широко известной теории хрупкого разрушения Гриффица [1]:

$$L = E \gamma / \pi p_c^2, \quad (1)$$

где  $L$  – длина трещины, м;  $\gamma$  – поверхностная энергия породы, Дж/м<sup>2</sup>.

Метод граничных элементов [2] для тел с трещинами применяется в представлении, что непрерывные разрывы сдвигов вдоль трещины заменяются дискретным аппроксимированием, которое предусматривает разбивку трещины на  $N$

## Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.179	
GIF (Australia) = 0.356	ESJI (KZ) = 1.042	
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

граничных элементов, в пределах каждого элемента разрыв сдвигов принимаем постоянным.

Стандартная схема моделирования методом граничных элементов принимается как горизонтальный разрез шпура (рис. 1).

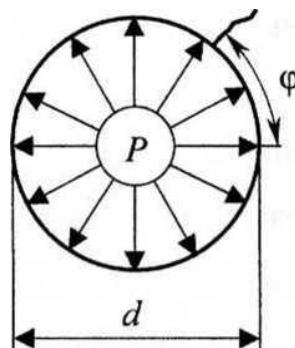


Рисунок 1 - Расчетная схема моделирования гидроразрыва.

Для определения направления распространения раскола при заданных граничных условиях рассчитывается конфигурация напряжений, обеспечивающих раскрытие трещины поля по приведенному критерию Гриффитца. Угол  $\varphi$  определяет ориентацию начальной трещины, а нагнетание жидкости в шпур обеспечивает равномерное давление на поверхность берегов трещины.

Имея аналитическое решение для одного разрыва можно получить численное решение

задачи суммируя для всех N элементов. Для этого применяется способ разрывных сдвигов, который позволяет определить суммарное распределение сдвигов вокруг трещины, если задать распределение усилий по контуру трещины. Этот способ позволяет вычислить значение сдвигов в каждом элементе, и напряжения, которые необходимы, чтобы вызвать такие сдвиги.

Прямолинейную трещину принимаем в виде отрезка оси x ( $|x| < a, y = 0$ ) (рис. 2).

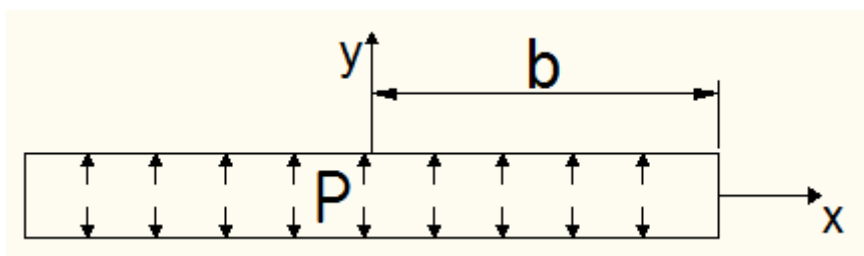


Рисунок 2 - Схема для решения задачи про трещину под внутренним давлением p.

Раскрытие трещины определяется как разность сдвигов противоположных сторон отрезка. Если учесть симметричность задачи и рассматривать только половину отрезка, а также учесть, что ширина трещины гораздо меньше ее длины, то для этих условий известно аналитическое решение, полученное С. Краучем [3], при рассмотрении задачи о бесконечном теле с трещиной, которая находится под внутренним давлением.

Кроме того, в задаче принято, что в бесконечности сдвиги и напряжения равны нулю, внутреннее пространство трещины заполнено несжимаемой жидкостью под давлением. Для

обеспечения постоянства разрыва сдвигов (или неизменной ширины трещины) размеры участков элементов принимаются значительно меньше по сравнению с величиной разрыва. Учитывая, что способ разрывных сдвигов предоставляет завышенные результаты, целесообразно выбрать количество элементов для расчета не менее 20.

Способ разрывных сдвигов может быть применен для криволинейных трещин[4], но их моделирование должно выполняться большим количеством элементов, что позволит применить прямолинейные отрезки на криволинейной траектории, но это увеличивает погрешность

## Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.179	
GIF (Australia) = 0.356	ESJI (KZ) = 1.042	
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

расчетов, поэтому целесообразно ограничиться предположением прямолинейных трещин.

Приложение равномерного давления жидкости к поверхности берегов трещин в целом вызывает перемещение берегов относительно друг друга (рис. 3), в способе разрывных сдвигов предполагается, что движение поверхности берегов трещин не ограничивается, поэтому возможно перекрытие берегов трещин, что исключается применением специальных физических условий. Возможная нелинейность задачи решается пошаговым заданием нагрузок, что значительно усложняет численную процедуру.

С помощью прикладной программы TWODD[5] можно рассмотреть

взаимодействие двух параллельных трещин, которые деформируются под действием давления в жидкости, заполняющей внутреннее пространство трещин. Однако при постановке задачи распределение тангенциальных напряжений при переходе через трещинное пространство должно иметь разрыв, что нарушает равномерность распределения напряжений и исключает условие непрерывности напряженного состояния среды. Устранение этого противоречия программными методами требует дополнительного вычисления касательных напряжений и сдвиговых смещений, что значительно усложняет численную процедуру[6]. Поэтому рассмотрение этой постановки является нецелесообразным.

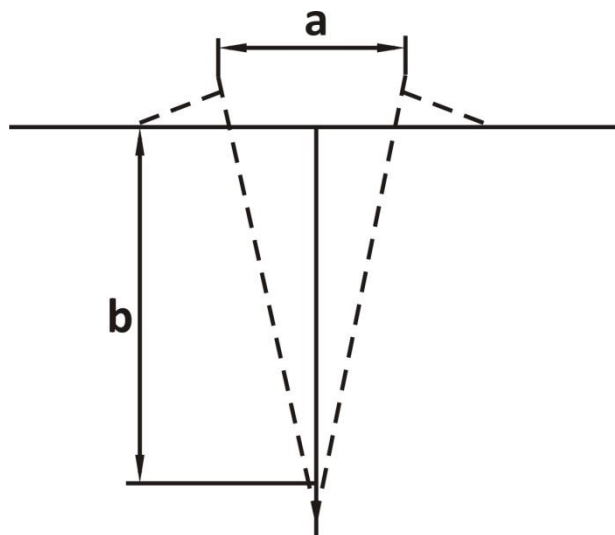


Рисунок 3 - Схема деформирования трещины внутренним давлением.

С помощью программы TWODD рассматриваются задачи деформирования трещины, которая начинается с полуплоскости, и находится под действием разрывных усилий (внутреннего давления). Для решения применяется метод «зеркальных отражений»[7], основанный на суперпозиционировании двух

берегов трещин, что позволяет получить достаточно точную картину деформирования трещины. Наиболее точные результаты достигаются при углах наклона трещины к плоскости обнажения  $45^\circ$  в однородной среде (рис. 4).

## Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.179	
GIF (Australia) = 0.356	ESJI (KZ) = 1.042	
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

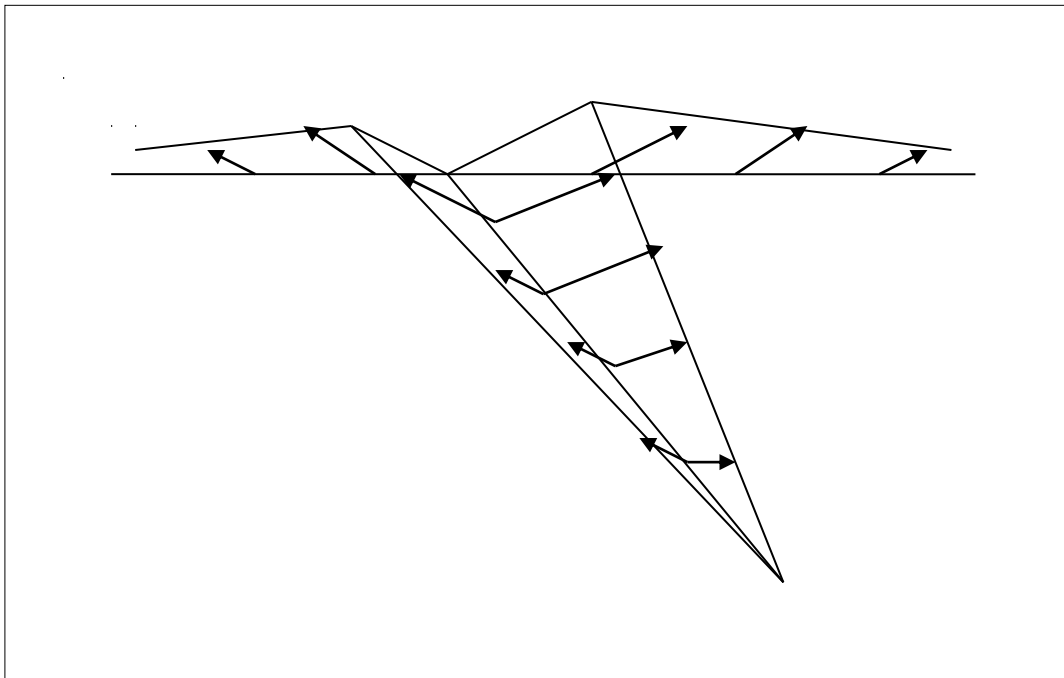


Рисунок 4 - Профиль смещений для трещины под углом  $\varphi = \frac{\pi}{3}$ .

Одним из недостатков программы TWODD для решения задачи деформирования трещины под внутренним давлением является значительная погрешность при расчете элементов вершины трещины (более 20%). Устранение этого недостатка в программе предполагается применением специальных элементов программирования, которые только частично улучшают точность решения (не ниже 12%) несмотря на увеличение элементов для вычисления.

Упругие напряжения вокруг вершины трещины принимают [8]:

$$\sigma = k(2\pi r)^{-1/2} \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент интенсивности напряжений  $k_I = p(\pi b)^{1/2}$ .

Распределение нормальных смещений вдоль трещины имеет вид[9]:

$$u_y(x) = -\frac{2(1-\nu)}{G} \cdot p \cdot b(1 - x^2/b^2)^{1/2}, \quad (4)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;

$G$  – модуль сдвига.

Принимая, что развитие радиальных трещин во времени на начальном этапе имеет линейный характер при постоянной скорости распространения трещины, и, вычисляя

конечную длину трещины, процесс развития трещины можно считать самозатухающим[10], потому что энергия давления от взрыва имеет конечное значение, а энергии, которая выделяется при образовании трещины, недостаточно для самоподдержания процесса. Перед остановкой скорость трещины монотонно уменьшается до нуля по логарифмической зависимости.

Приведенная численная процедура была использована для сравнительного анализа результатов экспериментального изучения образования трещин в образцах пород и на моделях, причем создание внутреннего давления в жидкости выполнялось подрыванием ВМ (тэн,дш).

Для исследования изменений начального трещинообразования на породной поверхности было изучено влияние импульсного приложения нагрузок через слой воды на образцах из лабрадорита (объемный вес – 2,8 кг / м<sup>3</sup>, прочность на сжатие - 180 МПа) размером 40x40x80 мм.

Результаты фиксировались при помощи электронного микроскопа с системой энергодисперсионного микроанализа РЭС – 106И представлены на рис. 5.

Следует отметить наличие значительного «заострения» выступов на поверхности породы с одновременным удалением мелких деталей и общее согласование оставшихся элементов

## Impact Factor:

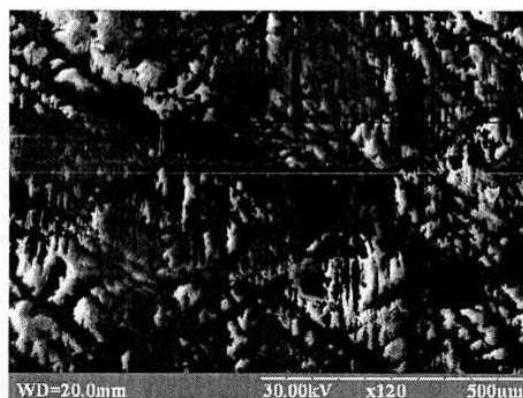
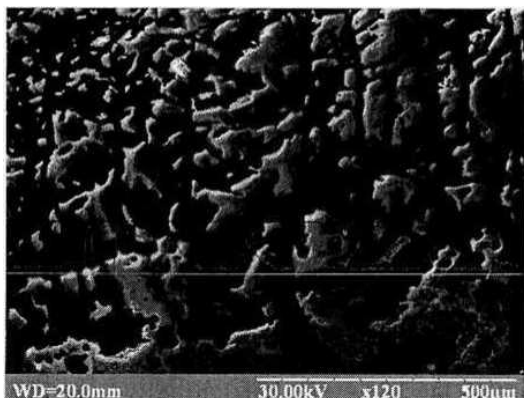
ISRA (India) = 1.344  
 ISI (Dubai, UAE) = 0.829  
 GIF (Australia) = 0.356  
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
 ПИНЦ (Russia) = 0.179  
 ESJI (KZ) = 1.042  
 SJIF (Morocco) = 2.031

ICV (Poland) = 6.630

поверхности с направлением действия давления

воды.



б)

**Рисунок 5 - Поверхность образца покрыта водой:**

**а) до взрывания;**

**б) после взрывания.**

Когда трещинное пространство заполнено водой, степень разрушения поверхности усиливается, так как вследствие малой сжимаемости вода в большей степени передает ударную волну и способствует расклиниванию

трещин, что в конечном итоге приводит к образованию более глубоких трещин.

Сравнение результатов экспериментального создания трещин в образцах и расчетных показателей приведено в таблице.

**Таблица 1**

**Сравнение фактических и расчетных показателей трещин.**

Порода	Прочность $\sigma_D$ , МПа	Среднее давление ПД $P_{ст}$ , МПа	Длина, факт/ расчет, см	Наличие видимых трещин
Мрамор	9,6	55,2	5,75/7,85	+
		51,2	5,33/6,41	+
		47,2	4,92/5,27	+
		43,4	4,52/5,19	—
		39,6	4,13/5,07	—
Лабрадорит	12,8	85,6	6,69/8,71	+
		81,0	6,33/8,49	+
		76,5	5,98/7,97	+
		72,1	5,63/7,83	—
		67,7	5,29/7,79	—
Гранит	14,3	99,7	6,97/8,81	+
		95,0	6,64/8,43	+
		90,2	6,31/8,03	+
		85,6	5,99/7,86	-
		81,0	5,67/7,45	-

В результате сравнения результатов экспериментальных исследований и расчетов было установлено, что показатели, полученные

расчетным путем имеют преимущественное превышение в диапазоне 32...78%. Примерно равные длины трещин наблюдаются для



## Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	РИИЦ (Russia) = 0.179	
GIF (Australia) = 0.356	ESJI (KZ) = 1.042	
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

различных пород, хотя при увеличении давления соответственно растет их средняя длина (8...25%).

Возможность формирования начальной трещины подрывом ВМ и особенности

трещинообразования изучали на образцах из сургуча и оргстекла, подбирая их размеры, согласно геометрическому подобию, в качестве заполнителя среды применяли воду (рис. 6).

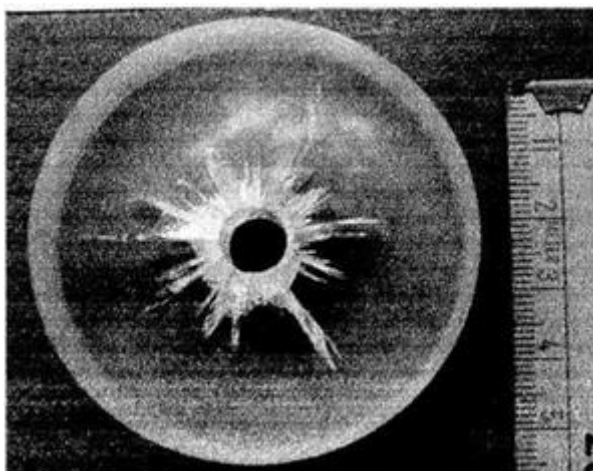
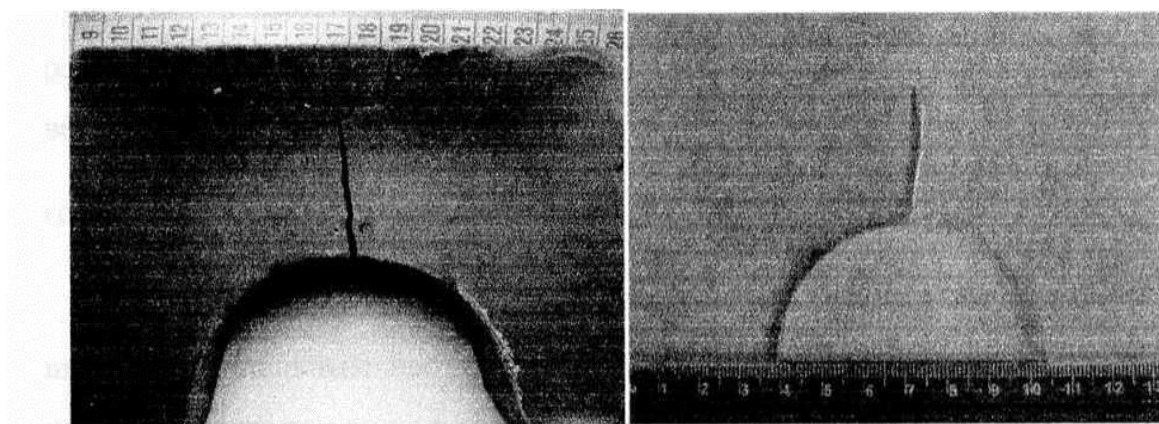


Рисунок 6 - Характер трещинообразования на модели из оргстекла.

Основная масса трещин имеет длину 2-4 радиусов отверстия, однако, в ближней зоне присутствует значительное перемалывание материала.



а)

б)

Рисунок 7 - Трещинообразование на моделях, заполненных водой:

а) из сургуча ;

б) из оргстекла.

## Impact Factor:

<b>ISRA (India)</b> = 1.344	<b>SIS (USA)</b> = 0.912	<b>ICV (Poland)</b> = 6.630
<b>ISI (Dubai, UAE)</b> = 0.829	<b>ПИИЦ (Russia)</b> = 0.179	
<b>GIF (Australia)</b> = 0.356	<b>ESJI (KZ)</b> = 1.042	
<b>JIF</b> = 1.500	<b>SJIF (Morocco)</b> = 2.031	

Наиболее длинные трещины (до 6 диаметров) и относительное отсутствие мелких трещин наблюдается в геометрически подобных шпурах радиусом 33 мм в оргстекле и радиусом 42 мм в сургуче.

В результате проведенных исследований определено фактическое превышение

показателей трещин, получаемое из прикладного моделирования, что позволяет корректировать проведение инженерных расчетов. Установлены наиболее оптимальные геометрические размеры исходных шпуров для создания первоначального трещинообразования.

## References:

1. Rice JR (2015) Mathematical analysis in mechanics of fracture // *Mathematical Fundamentals* [ed. H. Lejbowitz]. – New York, Academic Press. – vol. II– pp. 191-311.
2. Snyder MD, Cruse TA (1975) Boundary-integral equation analysis of cracked anisotropic plates. – *Int. J. Fracture*, 1975, 11, pp. 315-328.
3. Crouch SL, Starfield AM (1983) *Boundary elements in solid mechanics*. – G.Allen, London, 1983, pp. 328.
4. Cornet FH (1979) Comparative analysis by the displacements discontinuity method of two energy criteria of fracture.- *J.Appl. mech.* 1979. 46, pp. 349-355.
5. Melan E (1832) Point force at internal point in a semi-infinite plate. – *Z. Angew. Math. Mech.*, 1832, 12, pp. 341-346.
6. Green AE, Taylor JI (1945) Stress system in aeolotropic plates. – *Proc. R. Soc. Lond.* ,1945, pp. 181-195.
- a. Hackett P (1959) An elastic analysis of rock movements caused by mining. – *Trans. Inst. Min. Engng*, 1959, pp.421-433.
7. Rongved I (1957) Dislocation over a bounded plane area in an infinite solid.- *J. Appl. Mech.*, 1957, pp. 252-254.
- b. Shield RT (1951) Notes problems in hexagonal aeolotropic materials. – *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 1951, pp.401- 409.
8. Sneddon IN (1951) *Fourier transforms*. – New York: McGraw-Hill, 1951.