

УДК 622.234.573

**О ФОРМЕ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА ПОРОДНОГО МАССИВА  
В ОКРЕСТНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ**

**С. В. Сердюков, А. В. Азаров, Л. А. Рыбалкин, А. В. Патугин**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: ss3032@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлены результаты численных и экспериментальных исследований закономерностей развития трещин гидроразрыва в окрестности протяженной цилиндрической полости в изотропной упругой среде в условиях гидростатического и неравнокомпонентного объемных напряженных состояний. Показан характер влияния на кривизну и объем трещин расстояния между щелевым инициатором разрыва и полостью, прочности и сжатия среды. Приведены основные виды образующихся трещин, условия их формирования. По результатам физического моделирования и натурального эксперимента подтверждена достоверность численных исследований, возможность использования разработанных программных и методических решений в расчетах технологических гидроразрывов, выполняемых на небольших удалениях от подземных сооружений, горных выработок.

*Породный массив, горная выработка, напряженное состояние, гидравлический разрыв, форма трещин, давление рабочей жидкости, численное моделирование, расширенный метод конечных элементов, лабораторный и натуральный физический эксперимент*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210607

---

Гидроразрыв является эффективным способом дезинтеграции породного массива, создания в нем протяженных трещин для решения различных задач разработки месторождений полезных ископаемых и подземного строительства. В ряде технологий инъекционного укрепления пород полимерами, противofильтрационного экранирования инженерных сооружений [1], измерения напряженного состояния пород [2] разрывы проводят вблизи горных выработок — в зонах, где исходное напряженное состояние массива сильно изменено. Неоднородность поля напряжений ведет к искривлению траектории развития трещин, несимметричности их раскрытия, усложняет интерпретацию наблюдаемых давлений рабочей жидкости и проектирование работ.

Отдельные осесимметричные задачи развития трещин вблизи полостей рассматривались в 2D постановке [3–8]. Так, в [3] представлена плоская модель гидроразрыва в кровле горной выработки прямоугольной формы, в [5–8] изучалось поведение разрывов в упругих и порупругих средах, содержащих круговую полость.

В настоящей статье приведены результаты численных исследований, лабораторных и натуральных физических экспериментов по изучению закономерностей развития трехмерных трещин гидроразрыва в окрестности протяженной цилиндрической полости в изотропной упругой среде в условиях гидростатического и неравнокомпонентного объемных напряженных состояний.

### ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическое моделирование задачи выполнено в трехмерной постановке расширенным методом конечных элементов (XFEM) [9–11] в варианте с фантомными узлами [12], реализованном в среде Abaqus [13]. Использована когезионная модель разрушения материала (CZM) [14]. Применение указанного подхода позволяет получать решения, содержащие разрыв (скачок смещений), и оценивать напряжения вблизи вершины трещины без перестроения расчетной сетки в ходе роста трещины. Общее решение для смещений имеет вид

$$u(\xi) = \sum_{i=1}^N [N_i(\xi)u_i] + \sum_{i=1}^K H(\Phi(\xi))N_i(\xi)a_i,$$

где первое слагаемое в правой части соответствует стандартному методу конечных элементов, а второе — отвечает за разрыв. Приняты следующие обозначения:  $N_i(x)$  — базисные функции;  $N$  — число узлов в элементе;  $u_i$  — смещение в узлах;  $a_i$  — смещения в фантомных узлах;  $H(\Phi(\xi))$  — функция Хевисайда, связанная со скачком смещений при переходе через поверхность трещины;  $\xi$  — координата вдоль трещины;  $K$  — число элементов, пересеченных трещиной. За счет введения в расчетную схему дополнительных фантомных узлов трещина может пересекать конечные элементы (рис. 1).

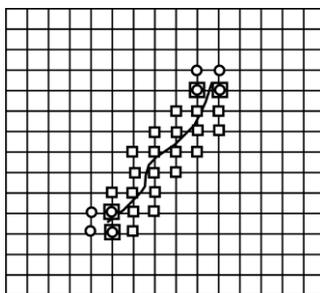


Рис. 1. Пример траектории трещины, рассчитанной расширенным методом конечных элементов (XFEM)

Рассматривается кубическая область изотропной упругой среды размером  $10 \times 10 \times 10$  м со сквозной цилиндрической полостью (выработкой) кругового сечения радиусом  $R=0.5$  м. Параллельно оси поверхности полости на расстоянии  $d$  от нее находится дисковая щель (инициатор разрыва) диаметром 0.2 м, сжатая горным давлением (начальное раскрытие ненагруженной щели 1 мм), в которую подается вода с постоянным темпом нагнетания (расходом)  $q=2$  л/с. Материал среды подобен углю: модуль упругости  $E=10$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu=0.3$ , критическая энергия разрушения  $G_c=120$  Н/м, критическое напряжение (прочность на растяжение)  $\sigma_c=0.1; 1$  и 2 МПа. Геометрические параметры и граничные условия задачи приведены на рис. 2.

Используется прямоугольная система координат  $(x; y; z)$ , оси которой совпадают с направлениями действия главных напряжений  $S_{xx}, S_{yy}, S_{zz}$  в среде. Образующая линия цилиндрической полости параллельна оси  $z$ , а плоскость инициирующей щели ортогональна оси  $x$ . Минималь-

ный размер конечных элементов расчетной сетки равен 3 см. Принятые граничные условия соответствуют схеме проведения лабораторного физического эксперимента, а размеры модели достаточно велики, чтобы закрепление границ не вызывало существенного расхождения напряженно-деформированного состояния области развития трещины с “безграничным” породным массивом.

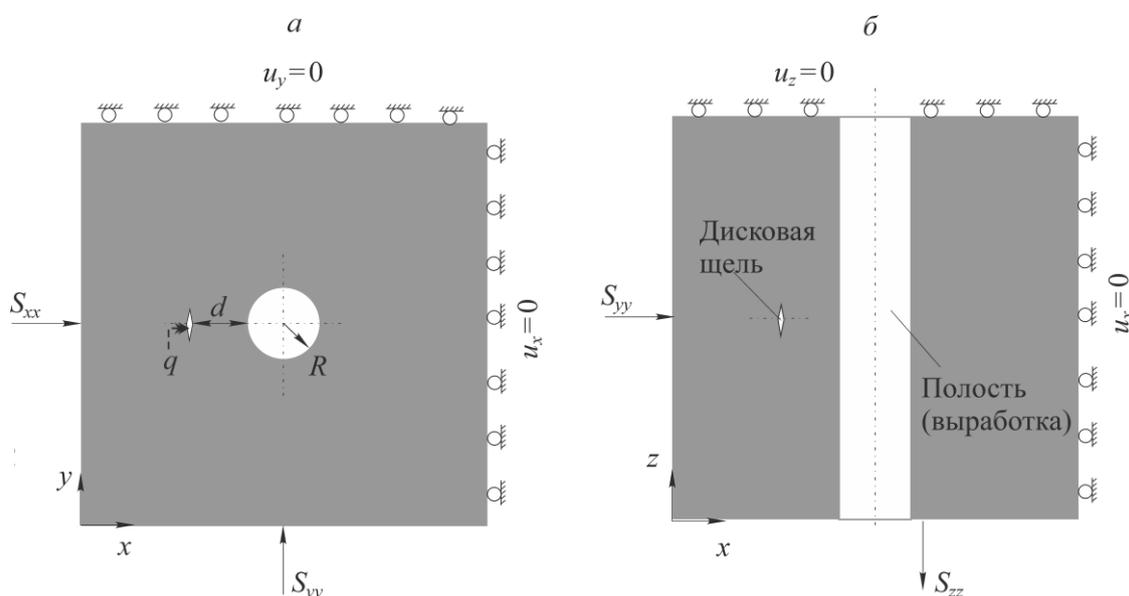


Рис. 2. Центральные сечения расчетной области среды в плоскостях  $xOy$  (а) и  $xOz$  (б):  $R$  — радиус полости;  $d$  — расстояние между полостью и дисковой щелью;  $q$  — темп нагнетания рабочей жидкости гидроразрыва;  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{zz}$  — нормальные нагрузки на грани кубической модели;  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  — компоненты смещения среды

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

### ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ

Сначала рассмотрим разрыв в ненагруженной среде ( $S_{xx} = S_{yy} = S_{zz} = 0$ ). Это необходимо для понимания влияния свободной поверхности полости на траекторию разрыва “в чистом” виде, без учета разгрузки напряжений горной выработкой. На рис. 3 приведен результат расчетов при удалении инициирующей дисковой щели от полости на расстояние  $d = 0.5R$ . Видно, что трещина в своем развитии принимает чашеобразную форму (рис. 3б), вытянутую вдоль полости (рис. 3а). Искривление в этом направлении приводит к выходу трещины в борт выработки (рис. 3б) и остановке дальнейшего роста. Похожее поведение наблюдается и при выполнении гидроразрывов вблизи плоской свободной границы [15], но в данной задаче геометрия разрыва более сложная.

С ростом гидростатического сжатия ( $S_{xx} = S_{yy} = S_{zz} = S$ ) характер разрыва меняется (рис. 4). В напряженной среде трещины вблизи полости растут преимущественно вдоль нее (проекция  $yOz$ ). При  $S = 3$  МПа и прочих заданных параметрах разрыв не пересекает выработку (рис. 4 — правый столбец, проекция  $xOz$ ,  $xOy$ ). После начального сближения трещина немного отскакивает и продолжает развиваться параллельно борту. Отметим, что детальное изучение отскока трещины и ее дальнейшего поведения требует увеличения размеров модели по  $z$ , существенно большего числа конечных элементов и времени счета. В настоящей статье исследуется развитие трещин только до момента достижения ими размера  $L_z = 2.5 - 3$  м вдоль оси  $z$ .

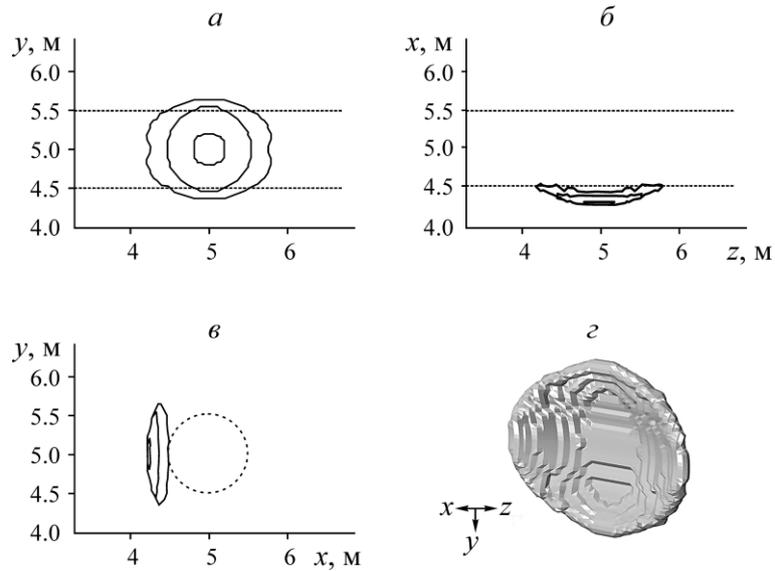


Рис. 3. Проекция трещины гидроразрыва на плоскости  $y_0z$  (а),  $x_0z$  (б),  $x_0y$  (в) в ненагруженной среде при  $d=0.5R$ ,  $\sigma_c = 1$  МПа и объемах закачанной жидкости  $V=0$ ; 206 и 627 мл (соответствуют контурным линиям); з — объемный вид трещины при  $V=627$  мл

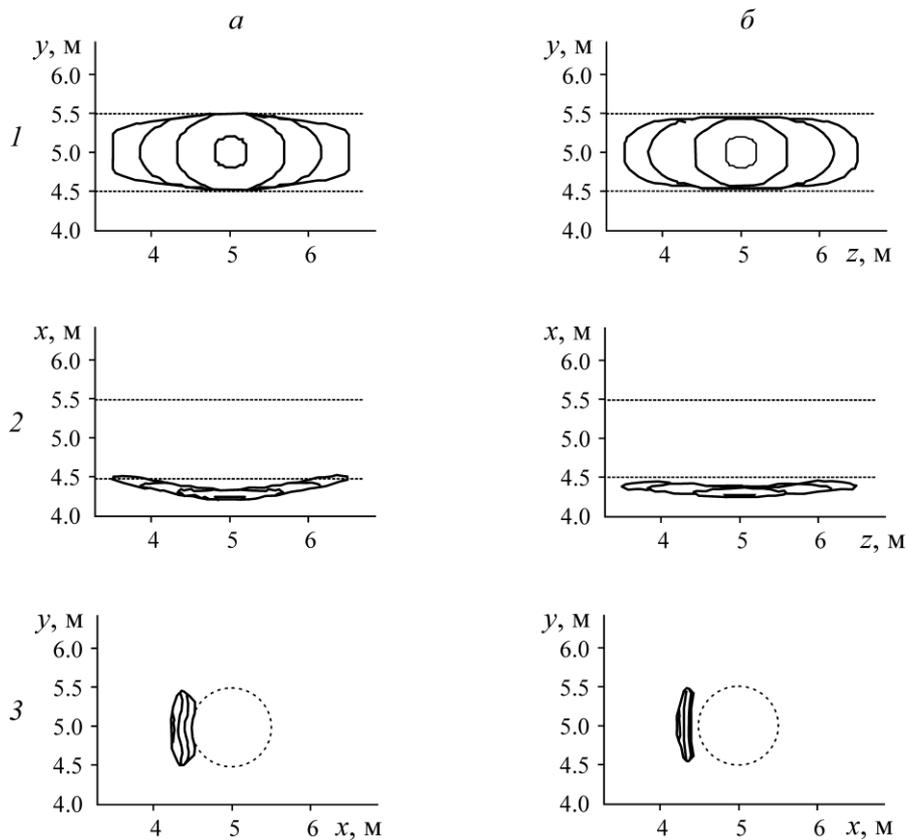


Рис. 4. Проекция трещин гидроразрыва при  $d=0.5R$ ,  $\sigma_c = 1$  МПа и разном гидростатическом сжатии  $S$ : а — при  $S=1$  МПа (контурные линии соответствуют объемам закачанной жидкости  $V=0$ ; 328; 610 и 813 мл); б — при  $S=3$  МПа (контурные линии соответствуют объемам закачанной жидкости  $V=0$ ; 338; 839 и 1019 мл); проекция: 1 —  $y_0z$ ; 2 —  $x_0z$ ; 3 —  $x_0y$

При меньшем гидростатическом сжатии модели ( $S=1$  МПа) разрыв прорастает в полость (рис. 4 — левый столбец, проекции  $xOz$ ,  $xOy$ ), но на большем удалении от инициирующей щели по  $z$ , чем в ненагруженной среде (рис. 3б, рис. 4 — левый столбец, проекция  $xOz$ ).

Размеры  $yOz$  проекций трещин, показанных на рис. 4, примерно равны, но объемы закачанной в них жидкости  $V$  разные и растут с увеличением гидростатического сжатия среды. В приведенном примере объемы трещин размером  $L_z \approx 3$  м составляют 1019 мл при  $S=3$  МПа и 813 мл при  $S=1$  МПа. Разница в значениях  $V$  объясняется увеличением давления разрыва  $P$  при повышении сжатия и прочности среды и, как следствие, асимметричного раскрытия трещины в сторону полости, поверхность которой деформируется под действием давления жидкости в трещине.

На рис. 5 представлены результаты расчетов, демонстрирующие зависимость формы разрывов от расстояния  $d$  между инициирующей щелью и полостью.

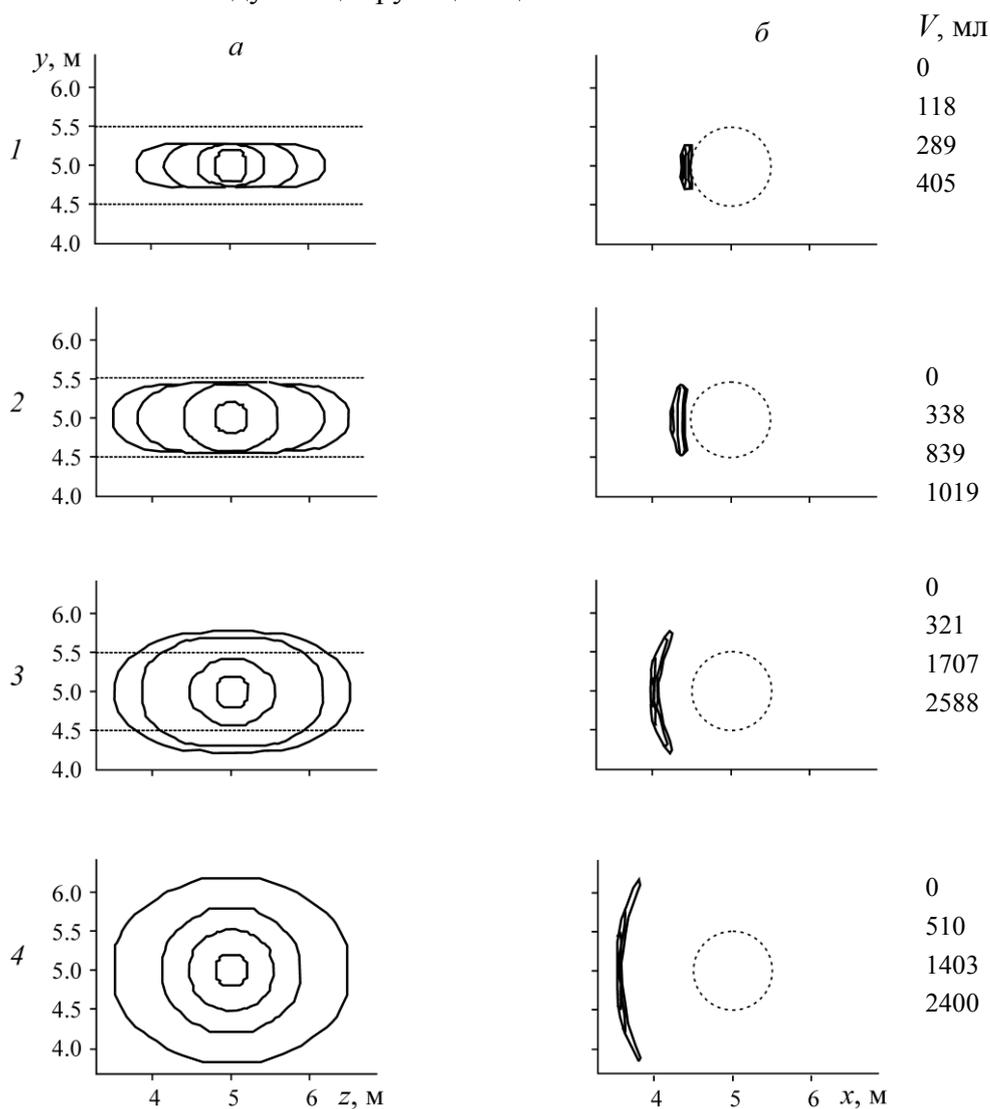


Рис. 5. Проекция трещин гидроразрыва при  $\sigma_c = 1$  МПа,  $S=3$  МПа на плоскости  $yOz$  (а) и  $xOy$  (б) при разных удалениях инициирующей щели от полости (контурные линии — проекции фронтов трещин при объемах закачки рабочей жидкости, приведенных справа): 1 —  $d=0.25R$ ; 2 —  $0.5R$ ; 3 —  $R$ ; 4 —  $2R$

Из приведенных на рис. 4, 5 проекций видно, что кривизна трещин при увеличении расстояния между инициатором и полостью уменьшается. При малых значениях  $d$  трещина быстро разворачивается в сторону выработки и может выйти в ее борт. Когда  $d=0.25R$  это происходит при закачке менее 0.5 л рабочей жидкости. По мере удаления дисковой щели от свободной поверхности влияние последней, как и следует ожидать, снижается, что проявляется в увеличении размеров трещины по  $y$  (при равных размерах по  $z$ ). Но и на расстоянии  $d=2R$  наличие полости сказывается на траектории развития трещины (рис. 5).

Сравнивая трещины, показанные на рис. 4, между собой, видим, что при равных размерах  $L_z$  их объемы зависят от  $d$  сложным образом. При переходе от  $d=0.5R$  к  $d=R$  и далее к  $d=2R$  объем сначала растет, а затем падает (рис. 5). Это может быть связано с разнонаправленным характером влияния двух факторов: роста площади стенок трещин и снижения их раскрытия из-за меньшей разгрузки сжимающих напряжений более удаленной полостью.

На рис. 6 представлены проекции трещин при разной прочности среды и прочих равных параметрах.

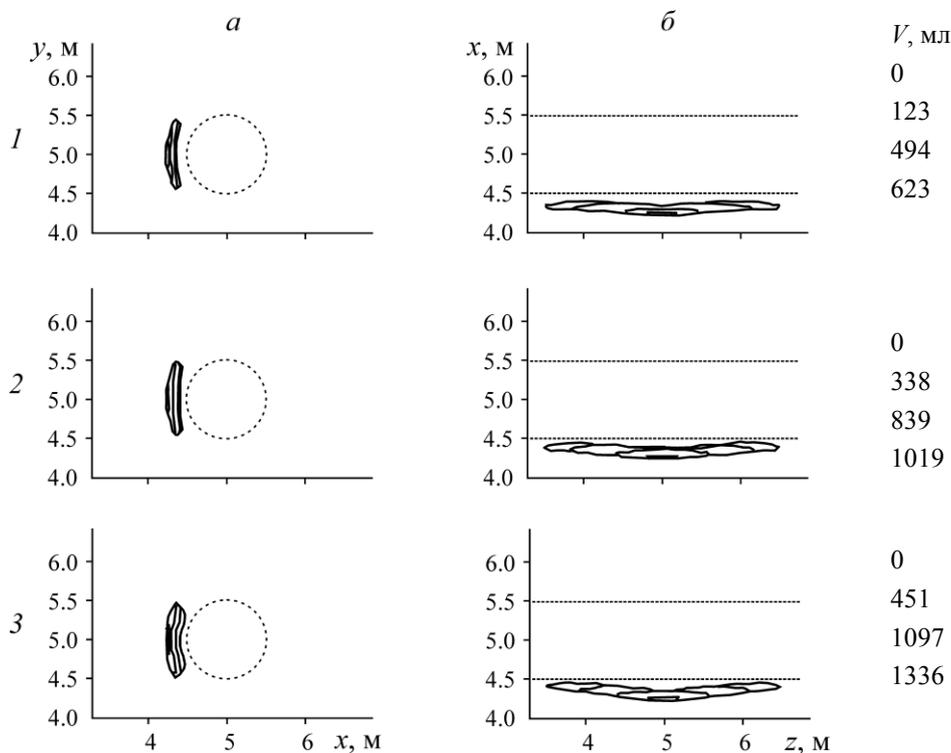


Рис. 6. Проекция трещин гидроразрыва при  $d=0.5R$ ,  $S=3$  МПа на плоскости  $x_0y$  (а) и  $x_0z$  (б) при разных значениях критического напряжения среды  $\sigma_c$ . Контурные линии — проекции фронтов трещин при объемах закачки рабочей жидкости, приведенных справа: 1 —  $\sigma_c=0.1$  МПа; 2 — 1 МПа; 3 — 2 МПа

Получено, что критическое напряжение (прочность на растяжение) углеподобного материала в исследованном диапазоне значений 0.1–2 МПа влияет в основном на раскрытие трещин и, соответственно, их объем, но не на размеры по  $y$  и  $z$ . Если в угле низкой прочности для формирования трещины длиной около 3 м на расстоянии  $0.5R$  от полости при сжатии 3 МПа требуется 623 мл рабочей жидкости, то в более прочных углях уже 1019 мл при  $\sigma_c=1$  МПа и 1336 мл при  $\sigma_c=2$  МПа (рис. 6).

Совокупность полученных результатов демонстрирует степень и характер влияния основных параметров модели на характер гидроразрыва в условиях гидростатического сжатия среды. Когда  $S_{xx} \neq S_{yy} \neq S_{zz}$  ситуация усложняется.

**ФОРМА ТРЕЩИНЫ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОКОМПОНЕНТНОГО ОБЪЕМНОГО СЖАТИЯ СРЕДЫ**

Пусть полость параллельна вектору одного из главных напряжений, что упрощает рассматриваемую задачу. Когда это максимальное сжатие, очевидно, что выход разрыва в борт выработки, по сравнению с гидростатическим напряженным состоянием среды, затруднен и трещина будет стремиться расти вдоль полости. Если наоборот — минимальное сжатие, и разрыв быстрее пересечет поверхность полости.

Более интересная ситуация возникает, когда вдоль оси  $x$  действует среднее по величине сжатие, а по  $y$  — минимальное. В этом случае энергетически выгодной является форма разрыва, при которой максимальная площадь проекции стенок трещины приходится на плоскость  $xOz$ . Это значит, что на первом этапе трещина должна расти преимущественно по дуге вокруг полости (в плоскости  $xOy$ ), а затем сменить направление своего развития на  $90^\circ$  вдоль выработки (по оси  $z$ ). Проиллюстрируем изложенное на примере, когда главные компоненты напряжений сильно отличаются друг от друга и указанные выше тенденции проявляются более отчетливо. На рис. 7 приведены расчетные проекции трещин в неоднородно сжатой среде ( $S_{xx} = 1.5$  МПа,  $S_{yy} = 0.5$  МПа,  $S_{zz} = 3$  МПа) при  $d = 2R$  и двух разных значениях критического напряжения  $\sigma_c$ .

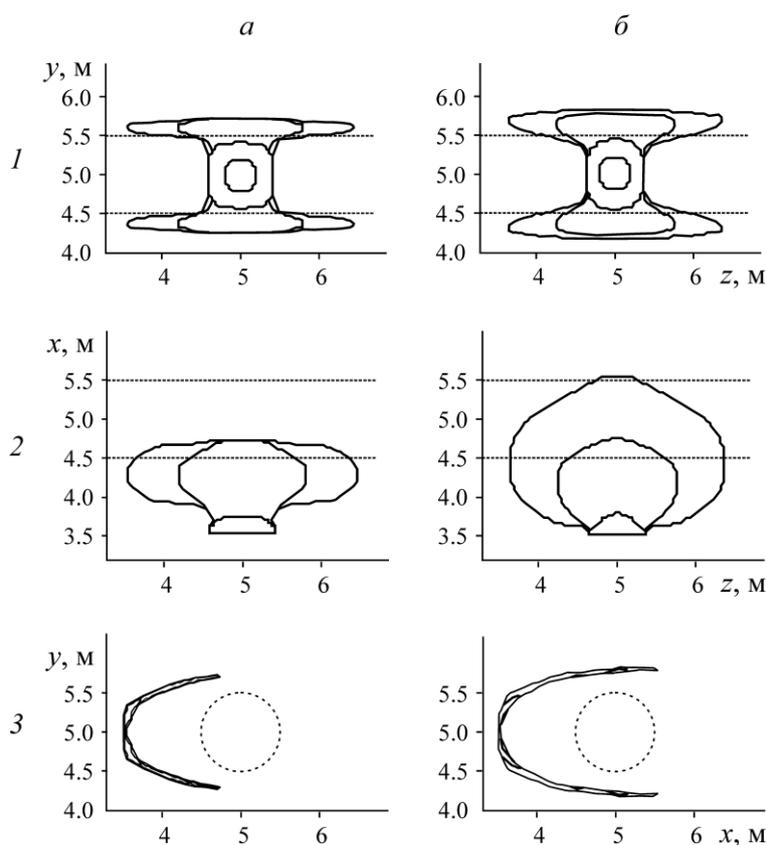


Рис. 7. Проекция трещин гидроразрыва при  $S_{xx} = 1.5$ ,  $S_{yy} = 0.5$ ,  $S_{zz} = 3$  МПа,  $d = 2R$  и двух значениях  $\sigma_c$ : *a* —  $\sigma_c = 0.1$  МПа; *б* —  $\sigma_c = 1$  МПа. Контурные линии — проекции фронтов трещин в разные моменты времени (при разном значении  $V$ ): 1 —  $yOz$ ; 2 —  $xOz$ ; 3 —  $xOy$

Из рис. 7 видно, что форма разрывов зависит от параметров задачи. При меньшей неоднородности поля напряжений похожие формы трещин будут наблюдаться на меньшем удалении от выработки. В более прочной среде охват полости трещиной больше. Этот эффект может быть использован для повышения эффективности защиты подземных инженерных сооружений от прорывов вод противодиффузионными экранами — трещинами гидроразрыва, заполненными твердеющими полимерными составами [1]. Отметим, что учет напряженного состояния породного массива, закономерностей формирования разрывов в окрестности горной выработки позволяет управлять геометрическими параметрами экрана, отчасти его формой, которая, как показывают численные исследования, может быть разной (рис. 8).

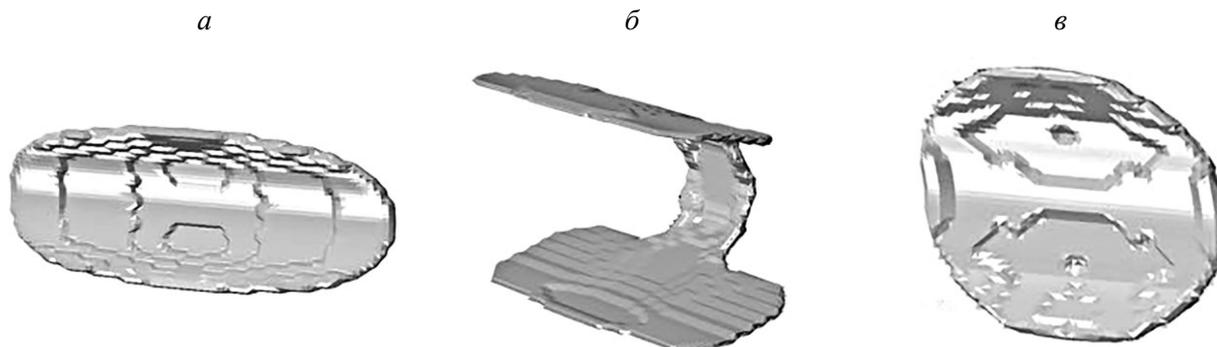


Рис. 8. Объемные виды трещин гидроразрыва в разных условиях:  $S_{xx}=2$  МПа,  $S_{yy}=1.5$ ,  $S_{zz}=3$  МПа;  $d=0.R$ ;  $\sigma_c=1$  МПа (а);  $S_{xx}=1.5$  МПа,  $S_{yy}=0.5$ ,  $S_{zz}=3$  МПа;  $d=2R$ ;  $\sigma_c=0.1$  МПа (б);  $S_{xx}=2$  МПа,  $S_{yy}=3$  МПа,  $S_{zz}=1.5$  МПа;  $d=R$ ;  $\sigma_c=1$  МПа (в)

### ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОРАЗРЫВА

Лабораторные эксперименты выполнялись на стенде, описание которого приведено в [16]. Использовалась модель кубической формы с ребром 420 мм из пескобетона марки М300 (цемент и песок в пропорции 1:2) (рис. 9).

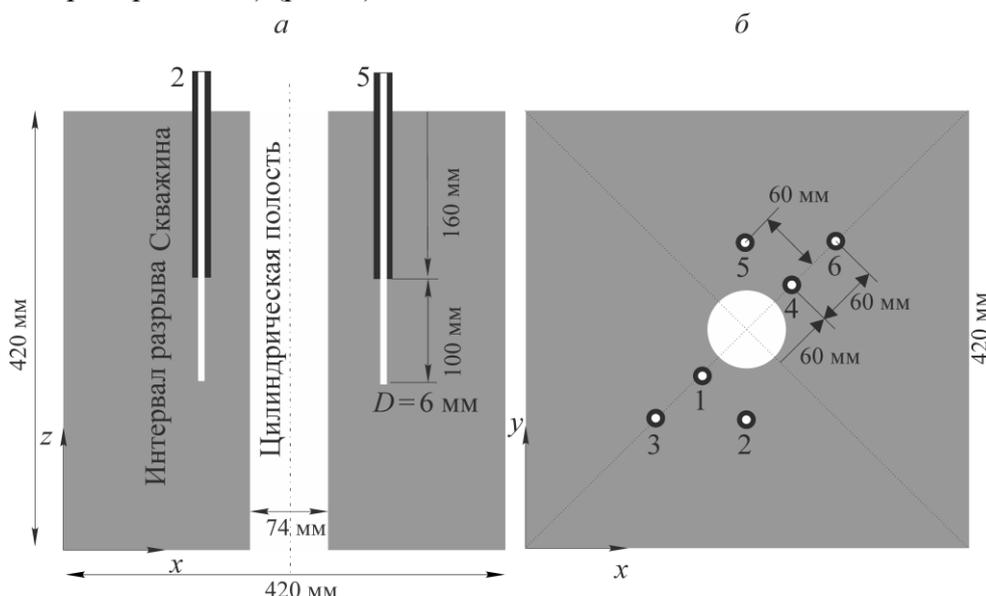


Рис. 9. Физическая модель для исследования гидроразрыва вблизи полости: а — центральное сечение в плоскости  $xOz$ ; б — сечение в плоскости  $xOy$  вблизи верхней грани модели: 1–6 — скважины

Всего проведено шесть гидроразрывов в скважинах от 1 до 6 по очереди (рис. 9). Рабочая жидкость — маловязкое гидравлическое масло марки МГЕ-46В. Конструкция скважин показана на рис. 9а. Интервал разрыва представляет собой необсаженный призабойный участок длиной 100 мм диаметром сечения 6 мм и расположен в середине модели по оси  $z$ . Разрывы в скважинах 1–3 выполнены в условиях гидростатического нагружения модели  $S_{xx}=S_{yy}=S_{zz}=4$  МПа, в скважинах 4–6 — при неравнокомпонентном сжатии:  $S_{xx}=4$  МПа,  $S_{yy}=8$ ,  $S_{zz}=4$  МПа.

На рис. 10 представлены фотографии готовой модели в ходе ее установки в камеру стенда. На рис. 10б виден силовой контур, охватывающий модель, стенки испытательной камеры, два плоских гидравлических домкрата бокового обжатия, создающие нагрузку до 200 тс каждый. Система вертикального нагружения, не показанная на рисунке, дает нагрузку до 400 тс.

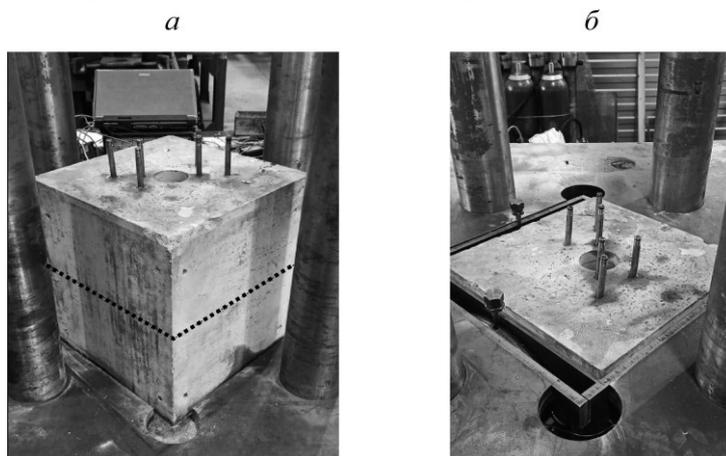


Рис. 10. Физическая модель и стенд для исследований гидроразрыва вблизи полости: *а* — без систем нагружения; *б* — в сборе с системой бокового нагружения. Пунктиром показана линия разламывания модели клиньями после выполнения экспериментов для определения траектории разрывов

В таблице приведены измеренные значения максимальных давлений в первом  $P_b$  и втором  $P_r$  циклах гидроразрыва, относительное удаление  $d/R$  скважин от полости, условия нагружения модели. Видно, что давления разрыва в скважинах, находящихся рядом с полостью (скв. 1; скв. 4), значительно ниже, чем в более удаленных (скв. 3; скв. 6).

Параметры эксперимента и давления гидроразрыва

Номер скважины	Удаление от полости $d/R$	Условия нагружения, МПа		Максимальное давление рабочей жидкости, МПа	
		$S_{xx}, S_{zz}$	$S_{yy}$	Первый цикл $P_b$	Второй цикл $P_r$
1	0.62	4	4	12	10
2	1.30	4	4	16	11
3	2.24	4	4	20	10
4	0.62	4	8	14	9
5	1.30	4	8	21	12
6	2.24	4	8	17	8

На рис. 11 приведены фотографии поверхностей разлома модели клиньями по завершению экспериментов и ее верхней грани со следами выхода образовавшихся трещин, а также результаты ручного трассирования обнаруженных разрывов. Поверхность на рис. 11б показана в зеркальном отображении (для удобства сравнения с остальными изображениями).

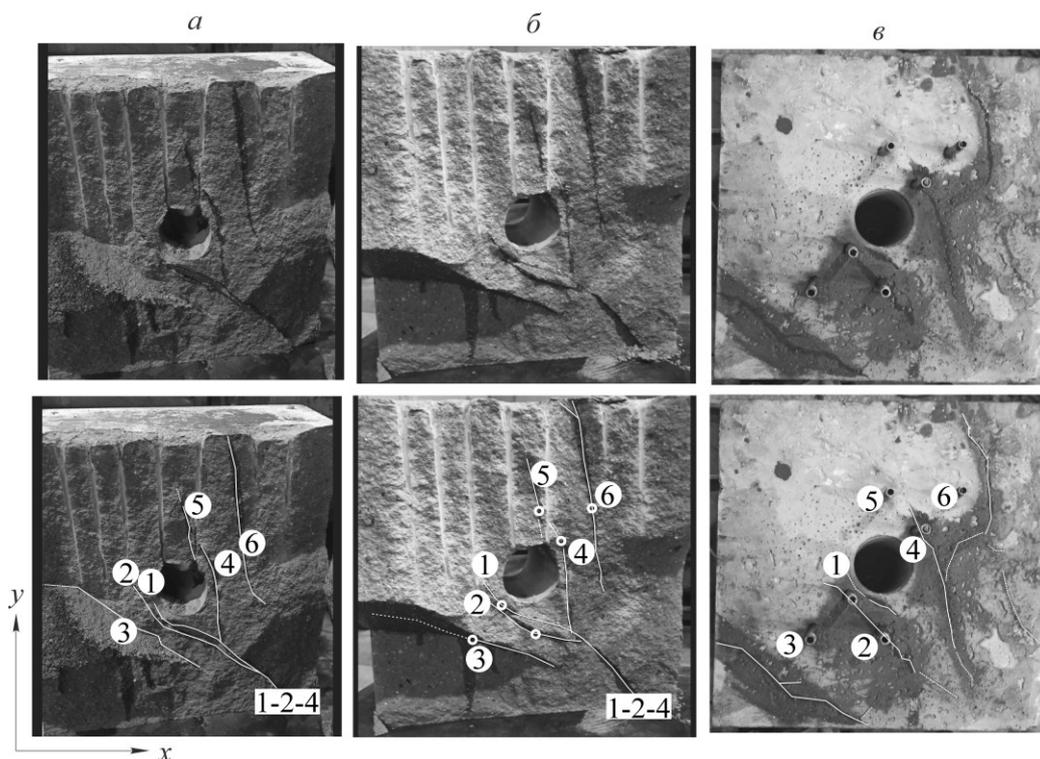


Рис. 11. Фотографии поверхностей разлома модели клиньями (*а, б*) и верхней ее грани (*в*) со следами выхода трещин гидроразрыва: верхний ряд — исходные фотографии; нижний — с результатами ручного трассирования разрывов. Сплошными и пунктирными линиями обозначены соответственно разломы, выявляемые более и менее уверенно

В условиях гидростатического нагружения формируются трещины, ориентированные преимущественно параллельно полости, причем первый, самый ближний разрыв № 1, имеет выраженную дугообразную траекторию (рис. 11*а, б*). Скважина 2 расположена близко к траектории разрыва № 1 (рис. 11*б*), что привело к слиянию трещин № 2 и 1, но в окрестности выработки трещина № 2 развивается самостоятельно и имеет такую же форму, что и № 1 (рис. 11*б*). Разрыв в скважине 3, удаленной на расстояние  $d=2.24R$ , близок к прямолинейному (рис. 11*а, б*). О малом влиянии на него полости говорит и то, что выход этого разрыва на поверхность верхней грани модели (рис. 11*в*) располагается от полости дальше устья самой скважины. Напротив, разрывы № 1 и 2 от выработки не отходят (рис. 11*в*). Трещина № 1 даже приближается к полости и на глубине около 260–280 мм от устья скважины пересекает стенку полости выработки.

В условиях неравнокомпонентного нагружения модели картина несколько меняется. Разрыв в скважине 5 развивается в плоскости  $yOz$  в сторону полости и выходит в нее по образующей линии (рис. 11*а, б*). Это связано с направлением действия максимального нагружения модели и соотношением сжимающих нагрузок. На контуре полости по линии пересечения с центральной плоскостью  $yOz$  сжатие в соответствии с известным решением о распределении напряжений в толстой пластине, содержащей отверстие, составляет  $3S_{xx} - S_{yy} = 4$  МПа, т. е. равно  $S_{xx}$ . Это делает выход трещины в борт выработки энергетически выгодным.

Разрыв № 4 имеет слабо выраженное искривление по дуге вокруг полости, по мере удаления от нее выходит на направление  $y$  и сливается с ранее созданными трещинами № 1, 2. Как и разрыв № 1, он примерно на той же глубине от устья скважины выходит в выработку.

Характер гидроразрыва в скважине 6 от полости не зависит — образующаяся трещина примерно ортогональна максимальному сжатию модели (рис. 11).

Полученные экспериментальные данные качественно согласуются с результатами численных исследований. Траектории разрывов вблизи цилиндрической полости имеют характерное дугообразное искривление. По мере увеличения расстояния влияние полости снижается.

### НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Установленные закономерности объясняют результаты ориентированного гидроразрыва, выполненного на Казском руднике в районе сочленения квершлага с полевым штреком, гор. +290 м (рис. 12).



Рис. 12. Схема расположения скважины гидроразрыва и контрольных скважин К0-К4 в натурном эксперименте

В месте проведения испытаний породный массив сложен однородными диоритами крепостью 14–16 по шкале М. М. Протодяконова, модуль упругости которых составляет 80–100 ГПа, коэффициент Пуассона  $\approx 0.1$ . Вертикальное горное давление около 4.9 МПа. Минимальное горизонтальное сжимающее напряжение  $\approx 2.2$  МПа определено по давлению запираения трещины продольного гидроразрыва, выполненного вне зоны влияния выработок.

Ориентированный гидроразрыв проведен в короткой горизонтальной необсаженной скважине диаметром 105 мм глубиной 2 м, пробуренной по нормали к борту полевого штрека в сторону квершлага. Рабочая жидкость — вода закачивалась насосом УН-35 с темпом подачи 0.58 л/с. Для принудительной ориентации разрыва поперек скважины использовалось специальное устройство, установленное на глубине около 1 м от ее устья [1]. В процессе разрыва наблюдалось пересечение трещиной контрольных скважин К0–К4, удаленных от инициатора разрыва на расстояния 2–20 м вдоль штрека. Давление разрыва, определенное по манометру на выходе насоса, равнялось 8–10 МПа, давление запираения полученной трещины после прекращения нагнетания воды составило около 1 МПа.

Форма трещины оценивалась по местоположению ее пересечений с пробуренными скважинами и шпурами (рис. 12). В ходе эксперимента зарегистрированы выходы трещины в контрольные скважины К0–К4 на глубине около 1 м от их устья. Водопроявления из вертикальных шпуров не наблюдались. По совокупности полученных данных можно с высокой долей вероятности утверждать, что разрыв произошел вдоль полевого штрека параллельно его борту без выхода в выработку. Форма полученной трещины соответствует расчетной на рис. 8а, как и следовало ожидать при данном напряженном состоянии породного массива и расположении инициатора разрыва.

Результаты проведенных численных исследований, физического моделирования и натурного эксперимента согласуются между собой, подтверждая возможность использования разработанных программных и методических решений для расчетов технологических гидроразрывов, выполняемых на небольших удалениях от подземных сооружений, горных выработок, анализа результатов проведенных работ.

### ВЫВОДЫ

Форма трещин гидроразрыва в окрестности цилиндрической полости (выработки) зависит от расстояния до нее, напряженного состояния и прочности среды. Возможно образование трещин разного вида: чашеобразных с выходом в полость, вытянутых вдоль нее, охватывающих полость по дуге с последующим разворотом в направлении ее оси.

При гидростатическом сжатии среды искривление траектории разрыва вокруг полости наблюдается на удалениях не менее ее диаметра. На малых расстояниях (менее половины радиуса полости) трещины, развиваясь вдоль выработки, разворачиваются в ее сторону, приобретая чашеобразную форму, и выходят на ее поверхность. На удалениях примерно от одного до двух радиусов выработки разрывы практически параллельны ее борту. Когда расстояние до цилиндрической полости больше ее диаметра, влияние последней на гидроразрыв незначительно. Увеличение горного давления препятствует выходу трещины в борт полости.

При неоднородном сжатии среды форма трещин гидроразрыва в окрестности выработки зависит от ее ориентации относительно главных напряжений и соотношения их величин. Если ось выработки совпадает с вектором наименьшего сжатия, формируются чашеобразные трещины, выходящие в ее борт. Степень неоднородности напряженного состояния среды влияет на зависимость кривизны образующихся трещин от расстояния до цилиндрической полости. Наиболее сложная форма наблюдается в сильно неоднородном поле напряжений, когда инициатор разрыва находится от полости в направлении действия среднего главного напряжения, а сама выработка ориентирована вдоль максимального сжатия. В этом случае трещина сначала растет по дуге вокруг полости, а после выхода в энергетически выгодную плоскость, ортогональную минимальному сжатию, разворачивается на  $90^\circ$  и продолжает развиваться вдоль выработки. Это явление может быть использовано для повышения эффективности защиты подземных инженерных сооружений от прорывов вод противофильтрационными экранами — трещинами гидроразрыва, заполненными твердеющими полимерными составами.

Результаты проведенных лабораторных и натуральных физических экспериментов согласуются с численными исследованиями. Экспериментально показано, что траектории разрывов вблизи цилиндрической полости имеют характерное дугообразное искривление, что подтверждает пригодность разработанных программных и методических решений для использования в расчетах технологических гидроразрывов, выполняемых на небольших удалениях от подземных сооружений, горных выработок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шилова Т. В., Сердюков С. В. Защита действующих дегазационных скважин от поступления воздуха из горных выработок через вмещающие породы // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 179–186.
2. Панов А. В., Скулкин А. А., Цибизов Л. В., Родин Р. И. Определение компонент природного поля напряжения по данным измерительного гидроразрыва // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2015. — Т. 2. — № 3. — С. 186–190.
3. Xia B., Zhang X., Yu B., Jia J. Weakening effects of hydraulic fracture in hard roof under the influence of stress arch, *Int. J. Min. Sci. and Tech.*, 2018, Vol. 28, No. 6. — P. 951–958.

4. **Liu Z., Lu Q., Sun Y., Tang X., Shao Z., Weng Z.** Investigation of the influence of natural cavities on hydraulic fracturing using phase field method, *Arabian J. for Sci. and Eng.*, 2019, Vol. 44, No 12. — P. 10481–10501.
5. **Chen Z., Li X., Dusseault M. B., Weng L.** Effect of excavation stress condition on hydraulic fracture behaviour, *Eng. Fracture Mech.*, 2020, Vol. 226. — P. 106871.
6. **Мартынюк П. А., Шер Е. Н.** О развитии трещины вблизи кругового отверстия с учетом внешнего поля сжимающих напряжений // ФТПРПИ. — 1996. — № 6. — С. 19–30.
7. **Shi F., Wang D., Chen X. A.** Numerical study on the propagation mechanisms of hydraulic fractures in fracture-cavity carbonate reservoirs, *Cmes-Computer Modeling in Eng. and Sci.*, 2021, Vol. 127, No. 2. — P. 575–598.
8. **Luo Z., Zhang N., Zhao L., Zeng J., Liu P., Li N.** Interaction of a hydraulic fracture with a hole in poroelasticity medium based on extended finite element method, *Eng. Analysis with Boundary Elements*, 2020, Vol. 115. — С. 108–119.
9. **Song J. H., Areias, P. M. A., and Belytschko T.** A method for dynamic crack and shear band propagation with phantom nodes, *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, 2006, Vol. 67, No. 6. — P. 868–893.
10. **Cruz F., Roehl D., do Amaral Vargas Jr. E.** An XFEM implementation in Abaqus to model intersections between fractures in porous rocks, *Computers and Geotechnics*, 2019, Vol. 112. — P. 135–146.
11. **He B.** Hydromechanical model for hydraulic fractures using XFEM, *Frontiers of Structural and Civil Eng.*, 2019, Vol. 13, No. 1. — P. 240–249.
12. **Belytschko T., Chen H., Xu J., and Zi G.** Dynamic crack propagation based on loss of hyperbolicity and a new discontinuous enrichment, *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, 2003, Vol. 58, No. 12. — P. 1873–1905.
13. **Азаров А. В., Курленя М. В., Сердюков С. В.** Программный комплекс для моделирования гидравлического разрыва пласта при добыче твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2020. — № 5. — С. 206–214.
14. **Ortiz M., Pandolfi A.** Finite deformation irreversible cohesive elements for three dimensional crack propagation analysis, *Int. J. Numerical Methods in Eng.*, 1999, Vol. 44, No. 9. — P. 1267–1282.
15. **Колыхалов И. В.** Физическое моделирование развития осесимметричных трещин при флюидоразрыве упругих сред пластическим материалом // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* — 2017. — Т. 4. — № 1. — С. 113–118.
16. **Сердюков С. В., Рыбалкин Л. А., Дробчик А. В., Патутин А. В., Шилова Т. В.** Лабораторный стенд для моделирования гидравлического разрыва массива трещиноватых пород // ФТПРПИ. — 2020. — № 6. — С. 193–201.

*Поступила в редакцию 21/X 2021*

*После доработки 02/XI 2021*

*Принята к публикации 11/XI 2021*