РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2023

№ 5

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.234.573

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОРАЗРЫВА ВБЛИЗИ ВЫРАБОТКИ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

А. В. Азаров, С. В. Сердюков

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

Представлены результаты численных исследований распространения трещины гидроразрыва в неоднородно напряженной упругой среде вблизи цилиндрической полости. Моделирование выполнено расширенным методом конечных элементов. Рассмотрены разные варианты ориентации главных напряжений по отношению к полости и дисковому инициатору разрыва. Показано влияние соотношения напряжений и их уровня на траекторию развития трещин. Приведены основные типы образующихся трещин. Проанализированы условия, при которых гидроразрыв выходит на поверхность полости, распространяется вдоль нее. Описаны особенности изменения давления распространения и раскрытия трещин различной формы в зависимости от закачанного объема рабочей жидкости.

Породный массив, горная выработка, напряженное состояние, гидравлический разрыв, форма трещин, цилиндрическая полость, раскрытие и давление распространения трещин, численное моделирование, расширенный метод конечных элементов

DOI: 10.15372/FTPRPI20230507

Гидравлический разрыв пласта — один из способов повышения эффективности и безопасности добычи полезных ископаемых. Его суть состоит в нагнетании в породу жидкости под большим давлением. В результате в породном массиве образуются протяженные трещины. С помощью этой технологии решаются такие задачи, как интенсификация добычи нефти и газа [1], определение напряженного состояния горных пород [2, 3], разупрочнение кровли угольных пластов [4–6], стимулирование их дегазации [7–9].

Для повышения результативности применения гидроразрыва требуется понимать закономерности развития трещин, уметь прогнозировать их форму, раскрытие. Известно много работ, в которых показано, что геометрия разрыва зависит от напряженного состояния и свойств горных пород, режима нагнетания, объема и свойств рабочей жидкости, конструкции оборудования и др. Меньшее число публикаций посвящено изучению особенностей гидравлического разрыва вблизи полостей, хотя это может понадобиться при решении различных задач горного дела и подземного строительства, например для противофильтрационного экранирования горных выработок и тоннелей [10], измерения напряженного состояния среды в их окрестности.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер гос. регистрации 121052500138-4).

Бо́льшая часть работ по изучению распространения трещин гидроразрыва вблизи полостей основана на численных исследованиях, причем чаще рассматриваются двумерные модели. В [11–15] исследован гидроразрыв в упругой среде вблизи круговой полости в плоской постановке и показано, что трещины могут искривляться и отклонятся от полости. Кривизна траекторий увеличивается с повышением уровня напряжений в среде. Локальное напряженное состояние в зоне влияния полости препятствует выходу разрыва на ее поверхность [11]. Согласно [13], выход трещины на поверхность полости зависит от соотношения между главными напряжениями. В [16] разработана модель гидравлического разрыва в кровле полости прямоугольной формы и установлено, что в этом случае траектория трещины имеет форму арки.

В [17–19] решена двумерная задача в пороупругой среде. При уменьшении проницаемости, увеличении коэффициента Био или темпа закачки жидкости искривление трещины вблизи полости уменьшается. В [20–22] изучены трехмерные модели, в которых моделировалось развитие разрыва вблизи полостей цилиндрической и сферической форм. Выявлено, что в некоторых случаях трещины распространяются вдоль полостей, не выходя на поверхность.

Цель настоящей работы — рассмотреть распространение трещины гидроразрыва вблизи цилиндрической полости в неоднородно напряженной упругой среде. Исследования выполнены на основе численных экспериментов и являются продолжением работы [23], где рассматривался более простой случай гидростатического распределения напряжений.

МОДЕЛЬ И ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Моделирование распространения трещины осуществлялось в квазистатическом приближении с помощью известной когезионной модели разрушения однородной линейно-упругой среды. Численное решение соответствующих уравнений получено расширенным методом конечных элементов (XFEM) [24], реализованным в программном пакете Abaqus. Процедура моделирования подробно описана в [17].

Расчетная область среды — куб со стороной 10 м. К его границам приложены нормальные внешние напряжения S_{XX} , S_{YY} , S_{ZZ} . Внутри находится цилиндрическая полость радиусом R = 1 м, имитирующая горную выработку, и небольшая начальная трещина, являющаяся инициатором гидроразрыва, в которую подается постоянный поток жидкости (рис. 1). Это тонкий диск радиусом r = 0.1R. Он ориентирован параллельно оси полости и удален от ее поверхности на расстояние d = R. Выбор указанных параметров обусловлен практическими соображениями работы вне слоя разрушенных пород, прилегающего к стенкам горной выработки, а также исследованием разрыва в зоне выраженного влияния цилиндрической полости на напряженное состояние среды [23].



Рис. 1. Расчетная область задачи: 1 — инициатор гидроразрыва; 2 — цилиндрическая полость

Используется локальная декартова система координат x, y, z, привязанная к полости. Точка x=y=z=5 м соответствует центру кубической модели. Ось полости лежит на линии x=y=5 м, параллельной оси z, центр дискообразного инициатора разрыва — на линии y=z=5 м, параллельной оси x. Она направлена вдоль радиуса полости, исходящего из центра кубической модели (рис. 2).



Рис. 2. Ориентация главных напряжений относительно полости и начальной трещины: a — ось полости наклонена под углом α к направлению действия S_{ZZ} в плоскости yz; δ — напряжение S_{XX} направлено под острым углом β к плоскости инициатора разрыва, S_{ZZ} действует вдоль полости

Рассмотрим ситуацию, когда направления напряжений S_{XX} , S_{YY} , S_{ZZ} и координатных осей x, y, z не совпадают. Проанализируем два варианта взаимной ориентации напряжений, полости и инициатора разрыва в пространстве:

1) ось полости наклонена под углом α к S_{ZZ} в плоскости yz (рис. 2*a*). Напряжение S_{XX} ортогонально плоскости инициатора разрыва;

2) напряжение S_{XX} направлено под острым углом β к плоскости инициатора разрыва, а S_{ZZ} действует вдоль полости (α =0), что равносильно повороту S_{XX} , S_{YY} вокруг оси полости на угол β (рис. 2 δ).

В [23] изучена подобная задача при гидростатическом распределении напряжений $S_{XX} = S_{YY} = S_{ZZ}$, в настоящей работе — более общий случай неоднородного поля напряжений в несимметричной постановке.

Расчеты выполнялись для модельной среды со следующими свойствами: модуль упругости $E = 10 \ \Gamma \Pi a$, коэффициент Пуассона v = 0.3, критическая энергия разрушения $G = 120 \ \text{H/m}$, прочность на растяжение $\sigma = 1 \ \text{M} \Pi a$. Динамическая вязкость рабочей жидкости гидроразрыва равна 0.001 $\Pi a \cdot c$, скорость ее закачки в трещину $q = 2 \ \text{дм}^3/c$, утечки во вмещающую среду отсутствуют.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовалась форма трещин гидроразрыва в зависимости от:

— соотношения напряжений S_{XX} , S_{YY} , S_{ZZ} при $\alpha = 2.5^{\circ}$;

— угла α при $S_{ZZ} > S_{XX} = S_{YY}$ и $S_{ZZ} < S_{XX} = S_{YY}$;

— угла β при $\alpha = 0$, $S_{XX} > S_{YY} = S_{ZZ}$ и $S_{XX} < S_{YY} = S_{ZZ}$.

Получены результаты по давлению распространения образующихся трещин, их раскрытию. Рассмотрим влияние на форму трещины гидроразрыва напряжений *Sxx*, *Syy*, *Szz* при малом (α =2.5°) отклонении направления действия *Szz* от оси полости.

Влияние отношения между напряжениями Szz и S_{XX} = S_{YY} при малом угле α . Численные эксперименты проводились при α = 2.5°, β = 0. На рис. За приведены расчетные траектории трещин гидроразрыва в плоскости xz, y = 5 м при S_{XX} = S_{YY} = 3.0 МПа, когда S_{ZZ} меньше других напряжений или равно им. Значение S_{ZZ} менялось от 1.5 (кривая 4) до 3.0 МПа (кривая 1) с шагом 0.5 МПа. Уменьшение *Szz* способствует выходу трещины в полость. Трещины распространяются несимметрично, преимущественно в сторону полости по направлению действия *Szz*.



Рис. 3. Траектории трещин гидроразрыва в плоскости *xz*, *y* = 5 м при угле наклона напряжения S_{ZZ} к оси полости α =2.5° для разных соотношений напряжений: $a - S_{XX} = S_{YY} = 3.0$ МПа, $S_{ZZ} = 3.0$ МПа (*I*), 2.5 (*2*), 2.0 (*3*), 1.5 МПа (*4*); $\delta - S_{XX} = S_{YY} = 3.0$ МПа, $S_{ZZ} = 3.0$ МПа (*I*), 4.5 (*2*), 6.0 МПа (*3*); $\delta - S_{XX} = S_{YY} = 1.0$ МПа, $S_{ZZ} = 0.66$ МПа (*I*), $S_{XX} = S_{YY} = 6.0$ МПа, $S_{ZZ} = 4.0$ МПа (*2*), $S_{XX} = S_{YY} = 1.0$ МПа, $S_{ZZ} = 1.5$ МПа (*3*), $S_{XX} = S_{YY} = 4.0$ МПа, $S_{ZZ} = 6.0$ МПа (*4*). Штриховая линия — границы полости

Если напряжение *Szz* превышает $S_{XX} = S_{YY}$, то гидроразрыв развивается вдоль полости, а траектории трещин в плоскости *xz*, y = 5 м для принятых в расчетах $S_{ZZ} = 3.0$, 4.5 и 6.0 МПа различаются незначительно (рис. 36). Исследовалось влияние уровня напряжений при неизменном соотношении между ними. Кривая *l* (рис. 36) отражает результаты при Szz = 0.66 МПа, $S_{XX} = S_{YY} = 1.0$ МПа, кривая *2* — при Szz = 4.0 МПа, $S_{XX} = S_{YY} = 6.0$ МПа. В обоих случаях *Szz* в 1.5 раза меньше S_{XX} , S_{YY} , но максимальные напряжения различаются в 6 раз. Несмотря на это, кривые *l* и *2* практически совпадают. Та же картина наблюдается, когда *Szz* больше других напряжений (рис. 36, кривые *3*, *4*). В этом случае трещина распространяется вдоль полости симметрично в обе стороны. Таким образом, траектория развития трещин в бо́льшей степени зависит от соотношения напряжений, чем от их уровня.

На рис. 4 представлены проекции трещин на плоскость *yz* в зависимости от объема закачанной рабочей жидкости при α =2.5°, S_{XX} = S_{YY} =3.0 МПа. Величина S_{ZZ} задавалась меньше остальных напряжений (2.0 МПа, рис. 4*a*) или больше (6.0 МПа, рис. 4*b*). В обоих случаях размеры проекций максимальны вдоль цилиндрической полости, но при S_{ZZ} < S_{XX} = S_{YY} они более вытянуты. Для достижения равной протяженности трещин вдоль полости при S_{ZZ} < S_{XX} = S_{YY} нужно меньше рабочей жидкости, чем при S_{ZZ} > S_{XX} = S_{YY} . В рассмотренных примерах ее объемы отличаются на порядок. Схожая картина наблюдается и при других распределениях напряжений, указанных на рис. 3.



Рис. 4. Проекции трещин гидроразрыва на плоскость *уz* в зависимости от объема закачанной рабочей жидкости при $S_{XX}=S_{YY}=3.0$ МПа, $\alpha=2.5^{\circ}$, $S_{ZZ}=2.0$ МПа (*a*), $S_{ZZ}=6.0$ МПа (*б*). Шкала — объем закачанной рабочей жидкости; штриховая линия — границы полости

Влияние отношения между напряжениями S_{XX} и $S_{YY} = S_{ZZ}$ при малом угле α . Напряжение S_{ZZ} направлено к оси полости под углом $\alpha = 2.5^{\circ}$. Величины S_{YY} и S_{ZZ} равны между собой. Исследовалось влияние на форму трещин гидроразрыва соотношения этих напряжений с S_{XX} , действующим перпендикулярно плоскости инициатора разрыва ($\beta = 0$).

На рис. 5*а* показаны траектории трещин в плоскости *xz*, *y*=5 м при $S_{YY}=S_{ZZ}=3.0$ МПа и $S_{XX}=1.5$ МПа (в 1.5 раза меньше S_{YY} , S_{ZZ}), $S_{XX}=4.5$ МПа (в 1.5 раза больше S_{YY} , S_{ZZ}) и $S_{XX}=6.0$ МПа (в 2 раза больше S_{YY} , S_{ZZ}). Увеличение S_{XX} ведет к более быстрому выходу трещины в полость (рис. 5*a*, кривые 2, 3). При $S_{XX} < S_{YY} = S_{ZZ}$ разрыв происходит параллельно поверхности полости (рис. 5*a*, кривая *l*). Трещина растет равномерно во все стороны, ее форма близка к диску. Это видно по проекции разрыва на плоскость *yz* (рис. 5*b*, контур *l*). Если S_{XX} больше остальных напряжений, то трещина развивается преимущественно в одну сторону и останавливается после выхода в горную выработку (рис. 5*b*, контур *2*).



Рис. 5. Траектории трещин гидроразрыва в плоскости *xz*, y = 5 м (*a*) и контуры проекции трещин на плоскость *yz* (*б*) при $S_{YY}=S_{ZZ}=3.0$ МПа, $\alpha=2.5^{\circ}$, $\beta=0$, $S_{XX}=1.5$ МПа (*1*), 4.5 (*2*), 6.0 МПа (*3*). Штриховая линия — границы полости

При $S_{XX} = S_{YY}$, $S_{YY} = S_{ZZ}$ и малом отклонении S_{ZZ} от оси полости наблюдаются трещины трех различных видов. Одни из них несимметричны относительно инициатора разрыва и выходят в полость. Такая ситуация имеет место, когда $S_{ZZ} < S_{XX} = S_{YY}$ или $S_{XX} > S_{YY} = S_{ZZ}$. Пример показан на рис. 6a, б, в. Проекции разрыва приведены на плоскости yz, xz, xy для напряженного состояния $S_{XX} = S_{YY} = 3.0 \text{ MII}$ а, $S_{ZZ} = 1.5 \text{ MII}$ а. Трещины другой формы сильно вытянуты вдоль полости. На начальном этапе они растут, огибая ее, но с определенного объема закачанной рабочей жидкости развиваются преимущественно вдоль полости. Пример такого разрыва при гидростатическом распределении напряжений $S_{XX} = S_{YY} = S_{ZZ} = 3.0$ МПа показан в трех проекциях на рис. 6г, д, е. В плоскости ху трещина искривлена из-за локального изменения напряженного состояния среды в окрестности полости. Подобная форма наблюдалась во всех случаях, когда $S_{ZZ} \ge S_{XX} = S_{YY}$. Если напряжение, действующее по нормали к инициатору разрыва, минимально $(S_{XX} < S_{YY} = S_{ZZ})$, трещина развивается практически равномерно во всех направлениях и ее форма напоминает слегка искривленный тонкий диск. На рис. 6ж, з, и представлены проекции такой трещины, полученной в численном эксперименте при $S_{XX} = 1.5$ МПа, $S_{YY} = S_{ZZ} = 3.0$ МПа. Увеличение расстояния между инициатором разрыва и полостью снижает влияние последней и, следовательно, кривизну образующейся дискообразной трещины [23].



Рис. 6. Проекции трещин гидроразрыва на плоскости *yz*, *xz*, *xy* при α =2.5°, β =0 и разных напряженных состояниях среды: *a*, *б*, *в* — *S*_{XX}=*S*_{YY}=3.0 МПа, *S*_{ZZ}=1.5 МПа; *z*, *d*, *e* — *S*_{XX}=*S*_{YY}=*S*_{ZZ}=3.0 МПа; *ж*, *s*, *u* — *S*_{XX}=1.5 МПа, *S*_{YY}=*S*_{ZZ}=3.0 МПа. Шкала — объем закачанной рабочей жидкости, штриховая линия — границы полости

Влияние отношения между напряжениями S_{YY} и $S_{XX}=S_{ZZ}$ при малом угле α . На рис. 7 показаны расчетные траектории разрывов, когда S_{YY} меньше (рис. 7*a*, δ) или больше (рис. 7*b*) напряжений $S_{XX}=S_{ZZ}=3.0$ МПа, а ось полости наклонена под углом $\alpha=2.5^{\circ}$ к направлению действия S_{ZZ} . При $S_{YY} < S_{XX} = S_{ZZ}$ трещина развивается несимметрично в плоскости *xy* в одну сторону от инициатора разрыва. На начальном этапе она огибает полое цилиндрическое включение по окружности, приближаясь к поверхности полости (рис. 7*a*, кривые 2, 3). Это происходит до тех пор, пока направление ее роста не становится ортогональным направлению действия S_{YY} . Далее трещина распространяется преимущественно вдоль оси полости. Сближение разрыва с полостью усиливается с уменьшением S_{YY} . То же наблюдается и с повышением уровня напряжений при сохранении соотношения между ними (рис. 7*b*).

Когда $S_{YY} \ge S_{XX} = S_{ZZ}$, трещина растет вдоль полости, огибая ее с обеих сторон в плоскости *ху* (рис. 7*в*). С увеличением $S_{YY} \ltimes S_{XX} = S_{ZZ}$ влияние полого цилиндрического включения уменьшается, искривление разрыва менее выраженно (рис. 7*в*, кривая *1*). Общее для исследованных состояний ($S_{XX} = S_{ZZ} = 3.0 \text{ MIa}, S_{YY} = 3.0, 4.5 \text{ и } 6.0 \text{ MIa}$) — форма образующихся трещин: все они подобны той, проекции которой приведены на рис. 6*г*, *д*, *е*.



Рис. 7. Траектории трещин гидроразрыва в плоскости *xy*, z = 5 м при угле наклона напряжения S_{ZZ} к оси полости $\alpha = 2.5^{\circ}$ для разных соотношений напряжений: $a - S_{XX} = S_{ZZ} = 3.0$ МПа, $S_{YY} = 3.0$ МПа (1), $S_{YY} = 2.0$ (2), $S_{YY} = 1.0$ МПа (3); $\delta - S_{XX} = S_{ZZ} = 1.0$ МПа, $S_{YY} = 0.5$ МПа (1); $S_{XX} = S_{ZZ} = 6$ МПа, $S_{YY} = 3$ МПа (2); $e - S_{XX} = S_{ZZ} = 3$ МПа, $S_{YY} = 6.0$ (1), 4.5 (2), 3.0 МПа (3)

Форма разрыва при заданных условиях существенно зависит от отношения $S_{YY} \ KS_{XX} = S_{ZZ}$. Когда оно меньше 1, образуются асимметричные трещины сложной геометрии. Их проекции на плоскости *xz*, *yz*, и *xy* для состояний $S_{XX} = S_{ZZ} = 3.0 \text{ MIa}$, $S_{YY} = 1.5 \text{ и } 2.0 \text{ MIa}$ в зависимости от объема закачанной рабочей жидкости приведены на рис. 8. Сперва трещина разворачивается по направлению действия S_{XX} и приближается к полости, затем растет вдоль нее. С уменьшением S_{YY} относительно других напряжений область распространения разрыва вдоль полости сужается (рис. 8a, *г*).



Рис. 8. Проекции трещин на плоскости *yz*, *xz*, *xy* при $S_{YY} < S_{XX} = S_{ZZ} = 3.0$ МПа, $\alpha = 2.5^{\circ}$, $\beta = 0$ в зависимости от соотношения напряжений и объема закачанной рабочей жидкости гидроразрыва: *a*, *б*, *в* — $S_{YY} = 1.0$ МПа; *c*, *d*, *e* — $S_{YY} = 2.0$ МПа. Шкала — объем закачанной рабочей жидкости, штриховая линия — границы полости

Влияние угла α . Расчеты выполнены для $\alpha = 5$, 45, 75, 90° и нескольких напряженных состояний двух видов: $S_{ZZ} < S_{XX} = S_{YY}$ и $S_{ZZ} > S_{XX} = S_{YY}$. На рис. 9 приведены примеры траекторий разрывов при $S_{ZZ} = 1.5$ МПа, $S_{XX} = S_{YY} = 3.0$ МПа и $S_{ZZ} = 6.0$ МПа, $S_{XX} = S_{YY} = 3.0$ МПа. Видно, что при $S_{ZZ} < S_{XX} = S_{YY}$ трещина в принятой модели выходит на границу полости всегда, когда $0 \le \alpha < 90^\circ$. Чем меньше угол α , тем более короткий путь. Разрыв не пересекает поверхности полости только при $\alpha = 90^\circ$ (минимальное напряжение ортогонально оси полости), как в случае трещины, проекции которой показаны на рис. 6 %, 3, u. Если $S_{ZZ} > S_{XX} = S_{YY}$, то наблюдаемая картина аналогична рассмотренной с тем отличием, что устойчивое развитие разрыва вдоль полости происходит при малом α (рис. 9 δ , кривая 1), а путь до пересечения с полостью уменьшается с увеличением α . Эти особенности отчетливо прослеживаются на траекториях трещин в плоскости xz, y = 5 м, приведенных на рис. 9 δ .



Рис. 9. Траектории трещин гидроразрыва в плоскости *xz*, *y* = 5 м в зависимости от напряженного состояния при α =5° (1), 45° (2), 75° (3), 90° (4): $a - S_{ZZ}$ =1.5 МПа < S_{XX} = S_{YY} =3.0 МПа; $\delta - S_{ZZ}$ =6.0 МПа > S_{XX} = S_{YY} =3.0 МПа. Штриховая линия — границы полости

Влияние угла β . Рассмотрим ситуацию, когда *Szz* действует вдоль полости ($\alpha = 0$), а напряжение *Sxx* направлено под острым углом β к плоскости инициатора разрыва (рис. 2*б*). Значение *Sxx* выбиралось либо меньше *Sxx* <*Syy* = *Szz*, либо больше *Sxx* >*Syy* = *Szz* двух других напряжений.

На рис. 10*а* показаны траектории образующихся трещин в плоскости *xy*, z = 5 м для нескольких углов β при $S_{XX} = 1.5$ МПа, $S_{YY} = S_{ZZ} = 3.0$ МПа. Известно, что в отсутствии горной выработки начальная трещина стремится развиваться в плоскости, ортогональной минимальному сжатию среды, в данном случае S_{XX} [25]. Как показали расчеты, локальная разгрузка напряжений вносит существенные искажения и способствует развороту трещины в сторону полости. При $\beta = 75^{\circ}$ разрыв сближается с нею настолько, что радиальные напряжения вокруг полости на его пути становятся меньше, чем S_{XX} . Это вызывает сильный дугообразный изгиб и "захват" разрыва полостью, при котором дальнейшее его развитие происходит вдоль горной выработки (рис. 10*a*, кривая 5). При углах $\beta = 0$, 15°, 30° и 45° наблюдается искривление лишь локального участка образующейся трещины, который далее развивается прочь от полости (рис. 10*a*, кривые 2–4). Если инициатор разрыва расположен настолько близко к горной выработке, что его сжатие окружающей средой меньше, чем минимальное внешнее напряжение на границах модели, то трещина распространяется вдоль полости и при меньшем значении β . Например, в случае d = R/2 это происходит при $\beta = 45^{\circ}$ (рис. 10*б*, кривая 2).



Рис. 10. Траектории трещин гидроразрыва в плоскости *xy*, *z*=5 м при α =0 в зависимости от угла β : *a* — *S*_{XX}=1.5 МПа, *S*_{YY}=*S*_{ZZ}=3.0 МПа, *d*=*R*, β =0 (*1*), 15° (*2*), 30° (*3*), 45° (*4*), 75° (*5*); δ — *S*_{XX}=1.5 МПа, *S*_{YY}=*S*_{ZZ}=3.0 МПа, *d*=*R*/2, β =15° (*1*), 45° (*2*), 75° (*3*); *e* — *S*_{XX}=6.0 МПа, *S*_{YY}=*S*_{ZZ}=3.0 МПа, *d*=*R*, β =90° (*1*), 75° (*3*), 30° (*4*)

На рис. 10*в* приведены результаты расчетов гидроразрыва при разных углах β и напряженном состоянии $S_{XX} = 6.0$ МПа, $S_{YY} = S_{ZZ} = 3.0$ МПа. В случае $\beta = 75$, 90° искривление трещин выработкой имеет местный характер, далее они развиваются симметрично в плоскости, ортогональной минимальному напряжению S_{YY} (рис. 10*в*, кривые 1, 2). При $\beta = 45^{\circ}$ происходит "захват" разрыва полостью, его развитие вдоль нее (рис. 10*в*, кривая 3). То же наблюдается и при меньшем угле β (рис. 10*в*, кривая 4).

Закономерности изменения формы образующихся трещин с увеличением объема закачанной рабочей жидкости видны на рис. 11. На рис. 11*a*, *б*, *в* представлены проекции разрыва на плоскости *xz*, *yz*, *xy* при *Sxx*=1.5 МПа, *Syy*=*Szz*=3.0 МПа и β =75° (соответствуют примеру на рис. 10*a*, кривая *5*), на рис. 11*г*, *д*, *е* — при том же напряженном состоянии, но β =45° (соответствует примеру на рис. 10*a*, кривая *4*). В случае β =75° на ранних стадиях закачки жидкости трещина растет несимметрично по дуге вокруг полости, затем развивается вдоль нее (рис. 11*b*). При β =45° трещина искривлена полостью, но растет, удаляясь от нее преимущественно в сторону наибольшего с ней сближения (рис. 11*г*, *д*, *е*). Объемы закачанной жидкости в обоих примерах почти совпадают и достигают 10–12 л. На рис. 11*ж*, *з*, *и* показаны проекции разрыва при *S_{XX}*=6.0 МПа, *S_{YY}*=*Szz*=3.0 МПа и β =45° (соответствуют примеру на рис. 10*e*, кривая *3*). На начальном этапе трещина сразу отклоняется от плоскости инициатора разрыва на 45° и развивается по направлению действия максимального сжатия *S_{XX}* в сторону сближения с полостью. По достижении максимума приближения трещина разворачивается и далее развивается преимущественно вдоль полости в форме узкой полосы, проекция которой на плоскость *yz* немного выступает за границы полости (рис. 11*з*).

Полученные результаты имеют практический интерес для формирования трещин требуемой конфигурации в окрестности горных выработок, тоннелей. Это необходимо при создании противофильтрационной защиты в местах пересечения с водопроницаемыми пропластками, разломными зонами, другими источниками интенсивных водопроявлений. Обычно для борьбы с притоком подземных вод применяют гидроизоляционные покрытия, наносимые на стенки выработки [26], или массированную пропитку вмещающих пород полимерами через большое количество неглубоких шпуров [26, 27]. Не останавливаясь на преимуществах и недостатках известных технологий, отметим общий для них большой расход химических реагентов.



Рис. 11. Проекции трещин на плоскости *xz*, *yz*, *xy* (слева направо) при α =0, S_{YY} = S_{ZZ} =3.0 МПа в зависимости от объема закачанной рабочей жидкости гидроразрыва: *a*, *б*, *в* — S_{XX} =1.5 МПа, β =75°; *c*, *d*, *e* — S_{XX} =1.5 МПа, β =45°; *ж*, з, *u* — S_{XX} =6.0 МПа, β =45°. Шкала — объем закачанной рабочей жидкости, штриховая линия — границы полости

Нами предложен другой способ — создание вокруг проблемного участка горной выработки системы оконтуривающих трещин гидроразрыва, заполненных твердеющим полимером, смешанным с проппантом. Последний нужен для предотвращения смыкания трещин после сброса давления в наполнителе. На рис. 12 приведена фотография системы трещин необходимой конфигурации, полученной при физическом моделировании гидроразрыва в неоднородно напряженной среде при максимальном и минимальном напряжениях 8.5 и 4.7 МПа соответственно. В экспериментах использовалась модель кубической формы с ребром 420 мм из цемента. Разрывы проводились в нескольких скважинах. Последовательное выполнение гидроразрывов вблизи цилиндрической полости привело к образованию системы пересекающихся друг с другом трещин, окружающих полость. Разрыв в более удаленной скважине (d = 3R), расположенной на рис. 12 в правом верхнем углу, ориентирован по направлению максимального сжатия модели. Результаты численного и физического моделирования показывают, что для создания сплошного экрана, охватывающего участок выработки длиной 5-10 м, требуется 3-4 трещины с общим объемом полимерного наполнителя не более нескольких десятков литров.



Рис. 12. Трещины в окрестности цилиндрической полости, полученной в физическом эксперименте

Давление распространения и раскрытие трещин. Рассмотрим зависимость давления и раскрытия трещин гидроразрыва вблизи полости от закачанного объема рабочей жидкости V_f . На рис. 13 приведены соответствующие расчетные графики для двух напряженных состояний: $S_{XX} = 1.5 \text{ МПа} < S_{YY} = S_{ZZ} = 3.0 \text{ МПа}$ и $S_{XX} = S_{YY} = 3.0 \text{ МПа} > S_{ZZ} = 1.5 \text{ МПа}$. Когда минимальным напряжением S_{\min} является S_{XX} , образуется дисковая трещина с небольшим искривлением (рис. 6ж, з, u). По мере удаления фронта разрыва от полости зависимость давления распространения P_f от V_f приобретает вид, характерный для радиально симметричных трещин: $(P_f - S_{\min}) \sim V_f^{-1/5}$ [28]. При равномерном распределении давления вдоль трещины (низкий темп подачи жидкости в трещину, нет утечек в среду) значение P_f ограничено снизу минимальным напряжением вне зоны влияния выработки, в нашем случае $S_{XX} = 1.5 \text{ МПа}$ (рис. 13*a*, *e*, кривые *l*). Размеры расчетной модели позволяют проследить развитие трещин радиусом 3–4 м, для которых давление распространения еще заметно выше S_{\min} (рис. 13*e*, кривая *l*).



Рис. 13. Зависимости давления распространения трещин (*a*, *в*) и их раскрытия на устье (δ , *г*) от закачанного объема рабочей жидкости в диапазонах 0–0.3 дм³ (*a*, δ) и 0–1.5 дм³ (*в*, *г*) для напряженных состояний среды: $I - S_{XX} = 1.5$ МПа, $S_{YY} = S_{ZZ} = 3.0$ МПа; $2 - S_{ZZ} = 1.5$ МПа, $S_{XX} = S_{YY} = 3.0$ МПа

В случае $S_{YY} < S_{XX} = S_{ZZ}$ гидравлический разрыв сначала огибает выработку, а потом развивается вдоль нее (рис. 8). Давление распространения трещины такой сложной формы на первом этапе выше, чем при $S_{XX} < S_{YY} = S_{ZZ}$ из-за большего ее сжатия средой (рис. 13*a*), но быстро падает с разворотом и приближением разрыва к полости. В дальнейшем оно стабилизируется (рис. 13*b*). Причина — несимметричное раскрытие криволинейной трещины, достигающее максимальных значений в зоне сближения с полостью, стенки которой деформируются под действием давления рабочей жидкости (рис. 14*b*). По мере распространения давление падает до уровня схлопывания трещины на участке ее дугообразного искривления у полости. Необходимым условием дальнейшего развития разрыва является подача жидкости в инициатор под давлением выше этого стабильного уровня. На рис. 13*b* (кривая 2) видно, что его значение в эксперименте составляет чуть больше 2.0 МПа, что существенно выше S_{min} . Для дисковой трещины давление распространения больше, чем для криволинейной, начиная примерно с $V_f > 0.25$ дм³. Но по мере увеличения ее радиуса оно будет приближаться к S_{min} , и в какой-то момент станет ниже давления распространения криволинейной трещины.

Раскрытие на устье криволинейной трещины (на границе инициатора разрыва) резко снижается после закачки около 0.15 л рабочей жидкости (рис. 136, г, кривые 2). Это связано с сильным падением давления распространения и особенностями изменения формы разрыва при сближении с полостью. В случае дисковидной трещины раскрытие на устье всегда максимально и монотонно возрастает с увеличением закачанного объема жидкости (рис. 136, г, кривые 1). Наблюдения за динамикой давления распространения разрыва могут использоваться для контроля формы образующейся трещины. Его ранняя стабилизация свидетельствует о "захвате" трещины горной выработкой.

Другим способом контроля геометрии разрыва служат наблюдения за деформацией стенок полости. На рис. 14 приведены два примера, показывающие смещение границ цилиндрической полости и раскрытие трещин: в плоскости xz, y=5 м при $S_{ZZ}=1.5$ МПа $< S_{XX}=S_{YY}=3.0$ МПа (рис. 14*a*); в плоскости xy, z=5 м при $S_{YY}=1.5$ МПа $< S_{XX}=S_{ZZ}=3.0$ МПа (рис. 14*b*). Для большой наглядности смещения на рисунках увеличены в 100 раз. Видно несимметричное раскрытие трещин и деформирование стенок полости, возрастающие с приближением разрыва к полости. Это позволяет использовать измерения деформаций поверхности выработки для контроля формы создаваемого противофильтрационного экрана.



Рис. 14. Смещения границ полости и раскрытие трещин (увеличены в 100 раз): *а* — в плоскости *xz*, *y* = 5 м при S_{ZZ} = 1.5 МПа, S_{XX} = S_{YY} = 3.0 МПа; *б* — в плоскости *xy*, *z* = 5 м при S_{YY} = 1.5 МПа, S_{XX} = S_{ZZ} = 3.0 МПа

выводы

При гидроразрыве неоднородно сжатой упругой среды с дисковым инициатором, параллельным близкорасположенной цилиндрической полости, образуются трещины трех видов: выходящие в полость, распространяющиеся вдоль нее и вглубь среды.

Трещины первого вида формируются в следующих случаях: напряжение вдоль оси полости меньше остальных; максимальное или минимальное напряжение ориентировано под углом к оси полости; максимальным является напряжение, действующее по нормали к плоскости инициатора разрыва. Скорость выхода трещины в полость зависит от соотношения напряжений, угла между ними и осью полости. Уровень напряжений влияет незначительно.

Трещины второго вида на начальном этапе развития огибают полость и приближаются к ней, а с определенного объема закачанной рабочей жидкости распространяются вдоль выработки. Они образуются, когда напряжение вдоль оси полости превышает остальные или когда минимальное напряжение направлено вдоль плоскости инициатора и ортогонально оси полости. Сближение криволинейных трещин с полостью увеличивается со снижением минимального напряжения относительно других.

Трещины третьего вида возникают при действии минимального напряжения под прямым или почти прямым углом к плоскости инициатора. Полость влияет только на начальном этапе развития такой трещины. Влияние снижается с уменьшением минимального напряжения по сравнению с другими главными напряжениями. Форма образующихся трещин близка к диску.

На начальном этапе давление распространения криволинейных трещин второго вида выше, чем дисковых трещин третьего вида, но быстро падает по мере сближения с полостью. В дальнейшем оно стабилизируется на постоянном уровне, необходимом для поддержания начального участка трещины в раскрытом состоянии. Этот уровень заметно выше минимального сжатия среды. Ранняя стабилизация давления распространения трещины — признак ее развития вдоль полости.

Особенности развития трещин второго вида приводят к тому, что их раскрытие на устье (в инициаторе разрыва) резко снижается после закачки определенного объема рабочей жидкости (в экспериментах менее 1 л), а максимум раскрытия смещен в зону сближения трещины с полостью. В случае дисковидной трещины третьего вида раскрытие на устье всегда максимально и монотонно возрастает с увеличением закачанного объема жидкости.

Близость трещины гидроразрыва к полости деформирует поверхность последней. Это проявляется в несимметричном раскрытии трещины преимущественно в сторону полости, увеличивает расход рабочей жидкости. Связь деформации поверхности горной выработки с формой разрыва позволяет использовать деформационные наблюдения для контроля трещинообразования.

Полученные результаты представляют практический интерес для формирования трещин заданной конфигурации в окрестности горных выработок и тоннелей. Это необходимо, например, для противофильтрационного экранирования выработок в местах интенсивного водопроявления путем создания оконтуривающих трещин гидроразрыва, заполненных твердеющим полимером.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Boak J. and Kleinberg R. Shale gas, tight oil, shale oil and hydraulic fracturing, Future Energy, Elsevier, 2020. P. 67–95.
- Wang H. Y. and Sharma M. M. Determine in-situ stress and characterize complex fractures in naturally fractured reservoirs from diagnostic fracture injection tests, Rock Mech. Rock Eng., 2019, Vol. 52, No. 12. P. 5025-5045.

- **3.** Amadei B. and Stephansson O. Rock stress and its measurement, Springer Science & Business Media, 1997.
- 4. He Q., Suorineni F. T., and Oh J. Review of hydraulic fracturing for preconditioning in cave mining, Rock Mech. Rock Eng., 2016, Vol. 49, No. 12. P. 4893–4910.
- 5. Чернов О. И., Гребенник О. И. Направленное воздействие на монолитную труднообрушающуюся кровлю в шахтах // Механика горных пород и механизированные крепи. Новосибирск: Наука, 1985. 254 с.
- 6. Liu J., Liu C., Yao Q., and Si G. The position of hydraulic fracturing to initiate vertical fractures in hard hanging roof for stress relief, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2020, Vol. 132. P. 104328.
- 7. Huang B., Cheng Q., and Chen S. Phenomenon of methane driven caused by hydraulic fracturing in methane-bearing coal seams, Int. J. Min. Sci. Technol., 2016, Vol. 26, No. 5. P. 919–927.
- 8. Сердюков С. В., Курленя М. В., Рыбалкин Л. А., Шилова Т. В. Влияние гидроразрыва угля на фильтрационное сопротивление зоны дренирования дегазационной скважины // ФТПРПИ. 2019. № 2. С. 3–13.
- 9. Lyu S., Wang S., Li J., Chen X., Chen L., Dong Q., and Huang P. Massive hydraulic fracturing to control gas outbursts in soft coal seams, Rock Mech. Rock Eng., 2022, Vol. 55, No. 3. P. 1759–1776.
- 10. 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.
- 11. Shi F., Wang D., and Chen X. A numerical study on the propagation mechanisms of hydraulic fractures in fracture-cavity carbonate reservoirs, CMES, 2021, Vol. 127. P. 575–598.
- Martynyuk P. A. and Sher E. N. Development of a crack close to a circular opening with an external field of compressive stresses, J. Min. Sci., 1996, Vol. 32, No. 6. — P. 453–463.
- Cheng L., Luo Z., Yu Y., Zhao L., and Zhou C. Study on the interaction mechanism between hydraulic fracture and natural karst cave with the extended finite element method, Eng. Fracture Mechan., 2019, Vol. 222. — 106680.
- Wang L., Wu X., Hou L., Guo Y., Bi Z., and Yang H. Experimental and numerical investigation on the interaction between hydraulic fractures and vugs in fracture-cavity carbonate reservoirs, Energies, 2022, Vol. 15, No. 20. — P. 7661.
- 15. Kao J. W., Wei S. M., Wang W. Z., and Jin Y. Numerical analysis of the hydraulic fracture communication modes in fracture-cavity reservoirs, Petroleum Sci., 2022.
- Xia B., Zhang X., Yu B., and Jia J. Weakening effects of hydraulic fracture in hard roof under the influence of stress arch, Int. J. Min. Sci. Technol., 2018, Vol. 28, No. 6. — P. 951–958.
- 17. Azarov A. V., Serdyukov S. V., and Patutin A. V. Investigation of hydraulic fracture in a poroelastic medium containing a cavity, J. Fundamental Appl. Min. Sci., 2020, Vol. 7, No. 1. P. 12–17.
- **18. He B. and Zhuang X.** Modeling hydraulic cracks and inclusion interaction using XFEM, Underground Space, 2018, Vol. 3, No. 3. P. 218–228.
- Luo Z., Zhang N., Zhao L., Zeng J., Liu P., and Li N. Interaction of a hydraulic fracture with a hole in poroelasticity medium based on extended finite element method, Eng. Analysis Boundary Elements, 2020, Vol. 115. — P. 108–119.
- **20.** Liu B., Jin Y., and Chen M. Influence of vugs in fractured-vuggy carbonate reservoirs on hydraulic fracture propagation based on laboratory experiments, J. Structural Geol., 2019, Vol. 124. P. 143–150.
- **21.** Kao J., Xu D., Bian X., Yin S., and Jin Y. Numerical analysis of interaction between Hydraulic fracture and a 3D spherical cave, 56th US Rock Mechan./Geomech. Symp. OnePetro, 2022.
- **22.** Qiao J. et al. The hydraulic fracturing with multiple influencing factors in carbonate fracture-cavity reservoirs, Comput. Geotech., 2022, Vol. 147. 104773.

- 23. Serdyukov S. V., Azarov A. V., Rybalkin L. A., and Patutin A. V. Shapes of hydraulic fractures in the neighborhood of cylindrical cavity, J. Min. Sci., 2021, Vol. 57, No. 6. P. 943–954.
- 24. Belytschko T., Chen H., Xu J., and Zi G. Dynamic crack propagation based on loss of hyperbolicity and a new discontinuous enrichment, Int. J. Numer. Meth. Eng., 2003, Vol. 58, No. 12. P. 1873–1905.
- **25.** Азаров А. В., Сердюков С. В. Трехмерное моделирование гидроразрыва изотропной упругой среды с щелевым инициатором на забое скважины // ФТПРПИ. 2021. № 6. С. 61–71.
- 26. Климчук И. В., Маланченко В. М. Опыт применения полимерных технологий на горнодобывающих предприятиях России // Горн. пром-сть. — 2007. — № 4. — С. 22–25.
- **27. Tunnel waterproofing** using polymeric membranes, Tunnel. Underground Space Technol., 1987, Vol. 2, Issue 1. P. 83-88.
- **28.** Perkins T. K. and Kern L. R. Widths of fractures, J. Petrol. Technol., 1961, No. 13. P. 937–949.

Поступила в редакцию 04/IX 2023 После доработки 12/IX 2023 Принята к публикации 15/IX 2023