

## РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.234.573

### О ФОРМЕ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА В ОКРЕСТНОСТИ СОПРЯЖЕНИЯ СКВАЖИНЫ С БОКОВЫМ СТВОЛОМ

А. В. Азаров, А. В. Патутин, С. В. Сердюков

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

Приведены результаты численных исследований трещин, образующихся при выполнении гидроразрыва в скважинах с ответвлениями (пересекающихся скважинах). Задача решалась в статическом приближении с определением направления распространения трещин по критерию максимальных тангенциальных напряжений и в квазистатической трехмерной постановке с анализом разрыва упругой однородной среды на основе когезионной модели разрушения и расширенного метода конечных элементов. Установлено влияние отдельных геометрических параметров инициатора разрыва и неоднородности напряженного состояния среды на направление развития и форму образующихся трещин. Показано преимущество X-образного инициатора, моделирующего ответвления и пересечение скважин, перед дисковой щелью при локальном управлении ориентацией гидроразрыва в неоднородно сжатом породном массиве.

*Скважина с боковым стволом, пересекающиеся скважины, породный массив, напряженное состояние, направленный гидравлический разрыв, трещина, траектория и форма разрыва, математическое моделирование, численные исследования*

DOI: 10.15372/FTPRPI20220505

Форма трещин гидроразрыва в основном зависит от напряженного состояния и анизотропии механических свойств среды, наличия в ней нарушений сплошности. В условиях горного давления развитием трещин можно управлять в локальной области массива, изменяя там действующие напряжения или снижая прочность пород. Такая задача возникает, когда нужно получить небольшие трещины заданной ориентации.

Обычно гидроразрыв выполняется в изолированном интервале единичной прямой скважины, расположенной вне зоны влияния других горных выработок. В этом случае дополнительное управляющее воздействие осуществляется в интервале разрыва. Это и создание иницирующих щелей и каверн, и дополнительное одноосное нагружение стенок скважины распорными устройствами, а также вдавливание в породу твердосплавных инденторов, профилирование раскрытия трещины путем подбора состава и режима нагнетания рабочей жидкости, щелевая (гидромеханическая) и упорядоченная кумулятивная перфорации обсадных колон, предварительное создание ориентированных мини-разрывов и пр. [1 – 16]

Другой подход заключается в управляющем воздействии через близко расположенные скважины. Это может быть синхронный гидроразрыв строчечной системы из двух и более параллельных скважин, включая их предварительную щелевую перфорацию по направлению друг к другу, или нагнетание воды и повышение порового давления, изменение поля напряжений в определенном сегменте близко расположенной скважины, в том числе за счет разгрузки щелевыми вырезами, полостями [17–24].

В условиях подземной разработки твердых полезных ископаемых наиболее распространен направленный гидроразрыв на основе инициирующих щелей, нарезаемых в стенках изолированного интервала скважины поперек ее оси. Способ применяют для разупрочнения труднообрушаемой кровли и интенсификации извлечения угольного метана из пластов разной проницаемости [25–27]. Когда требуется улучшить дегазацию тонких пластов, более эффективно создание дренажных трещин вдоль пласта [28]. Их можно получить с помощью одновременного гидроразрыва строчечной системы параллельных скважин. Как показали исследования [29], это возможно только при достаточно малых расстояниях между скважинами, что при практической реализации требует большого объема высокоточного направленного бурения [30, 31].

Вместо параллельных скважин дешевле и технически проще использовать единичные скважины с боковыми стволами (ответвлениями) вдоль пласта, технология создания которых хорошо отработана в шахтных условиях [32]. Область сопряжения бокового ствола со скважиной образует  $V$ -образный концентратор напряжений (инициатор разрыва), способствующий формированию продольной трещины в требуемой плоскости.

В настоящей работе приведены результаты численных исследований распространения трещины гидроразрыва из скважины с боковым ответвлением. Для анализа задачи используются два подхода. Первый состоит в решении статической задачи и определении направления развития трещины на основе вычисления коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$  и  $K_{II}$ , второй — в моделировании процесса разрыва в квазистатическом приближении с помощью расширенного метода конечных элементов.

### ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ И ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Рассмотрим трехмерную область, содержащую две пересекающиеся скважины (скважина с двумя зеркально симметричными боковыми стволами), между которыми уже имеются небольшие начальные трещины треугольной формы (рис. 1).

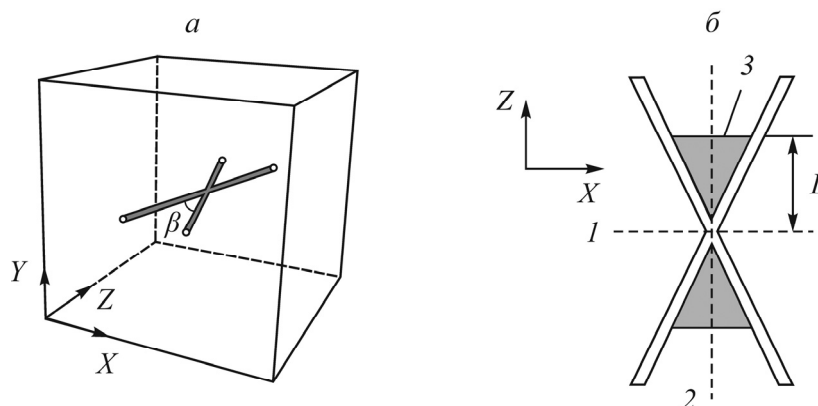


Рис. 1. Трехмерная область (а), содержащая две пересекающиеся скважины с треугольными трещинами, и параметры задачи (б):  $L$  — расстояние от точки пересечения осей скважин до фронта трещины;  $\beta$  — угол пересечения между скважинами; 1, 2 — оси симметрии; 3 — фронт начальной трещины

Такая симметричная постановка задачи с двумя  $V$ -образными концентраторами напряжений позволяет упростить построение расчетной сетки. Расстояние от точки пересечения осей скважин до фронта трещины обозначим через  $L$ , острый угол пересечения между скважинами —  $\beta$ . К стенкам скважин и поверхности трещины приложено давление  $P$ . Внешние границы расчетной области закреплены.

При выполнении численных исследований плоскость скважин поворачивалась вокруг одной из осей симметрии, показанных на рис. 1б, на заданный угол  $\gamma_i$ , где  $i=1, 2$  — номер оси. Так создавались условия для возникновения на фронте трещин сдвиговых напряжений. Пример поворота вокруг оси симметрии 1 с указанием направления действия вертикального напряжения  $S_{yy}$  приведен на рис. 2.

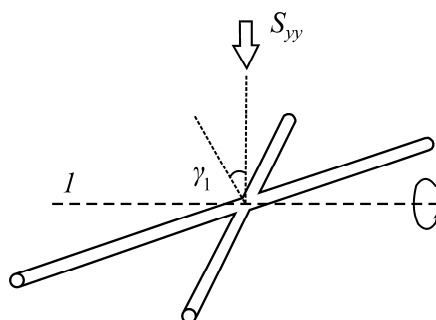


Рис. 2. Направление действия вертикального напряжения  $S_{yy}$  после поворота поля напряжений на угол  $\gamma_1$  вокруг оси симметрии 1

Размеры расчетной области составляли  $10 \times 10 \times 10$  м, диаметр скважин 0.1 м. На внешних границах области заданы сжимающие напряжения  $S_{xx} = S_{zz} = 1$  МПа. Модуль упругости среды  $E = 10$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ . Вертикальное напряжение  $S_{yy}$ , расстояние  $L$ , углы  $\gamma_i$  и  $\beta$  изменялись в ходе численных экспериментов. На рис. 3а представлен общий вид расчетной сетки в плоскости  $YZ$ , проходящей через точку пересечения осей скважин с координатами  $x=y=z=5$  м. Для более точного расчета коэффициентов интенсивности напряжений сетка сгущена вблизи фронта трещин (рис. 3б).

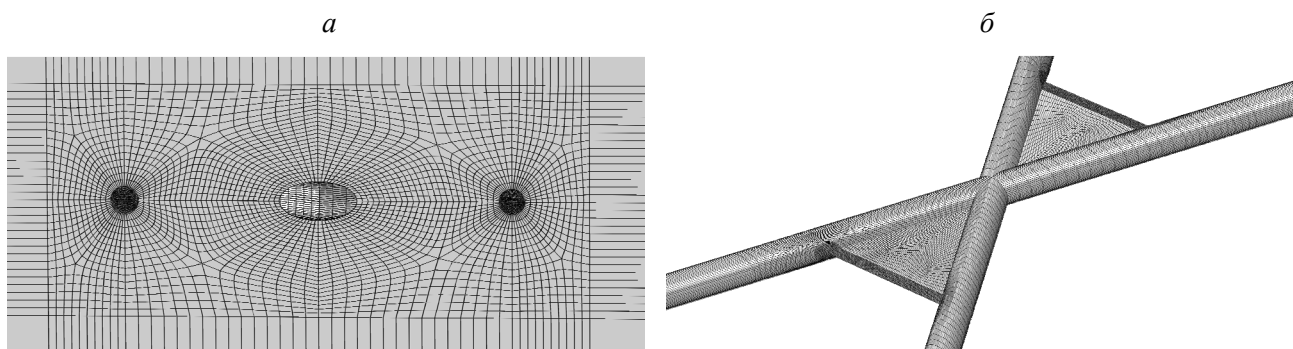


Рис. 3. Общий вид сетки в плоскости  $YZ$ ,  $x=5$  м (а) и на поверхностях трещин и скважин (б)

В ходе численных экспериментов исследовалось влияние скважин на направление распространения трещины в случае, когда вертикальное напряжение  $S_{yy}$  превышает горизонтальные  $S_{xx}$  и  $S_{zz}$ . Анализ осуществлялся на основе вычисления коэффициентов интенсивности

напряжений  $K_I$  и  $K_{II}$  на фронте трещины. Направление распространения трещины, характеризующееся углом  $\theta$ , определялось с помощью критерия максимальных тангенциальных напряжений:

$$\theta = \arccos[(3K_{II}^2 + \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2}) / (K_I^2 + 9K_{II}^2)].$$

# РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В первом примере рассмотрим влияние угла  $\gamma_1$  на направление распространения трещины. Заданы следующие параметры задачи: вертикальное напряжение  $S_{yy} = 1.5$  МПа, угол  $\beta = 60^\circ$ , давление  $P = 5$  МПа,  $L = 1$  м. Увеличение угла  $\gamma_1$  приводит к значительному повышению  $K_{II}$  (рис. 4б) и угла распространения трещины  $\theta$  — ее наклона к плоскости скважин (рис. 4в). Значение  $K_I$  меняется незначительно (рис. 4а).

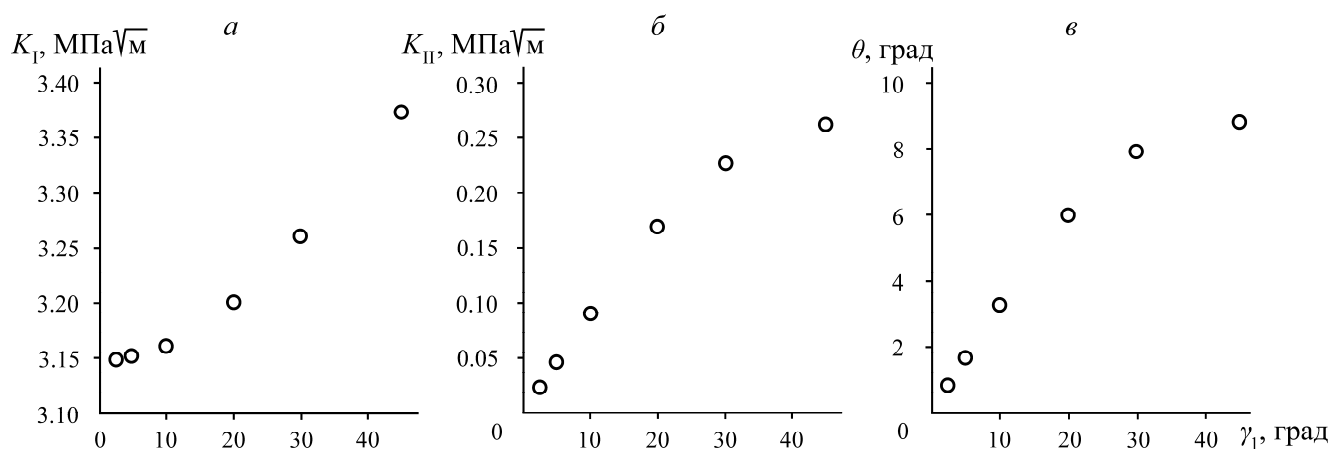


Рис. 4. Коэффициенты интенсивности напряжений  $K_I$  (а),  $K_{II}$  (б) и угол распространения трещины  $\theta$  (в) в зависимости от угла  $\gamma_1$  при  $L = 1$  м,  $S_{yy} = 1.5$  МПа,  $\beta = 60^\circ$

Оценим влияние длины  $L$  на угол распространения трещины  $\theta$ , когда  $S_{yy} = 1.5$  МПа,  $\beta = 60^\circ$ , а угол  $\gamma_1$  равен  $45^\circ$ , при котором сдвиговые напряжения вблизи фронта трещины максимальны. На рис. 5 показаны  $K_I$ ,  $K_{II}$  и угол распространения трещины в зависимости от приложенного давления  $P$  при  $L = 0.25, 0.50$  и  $1$  м.

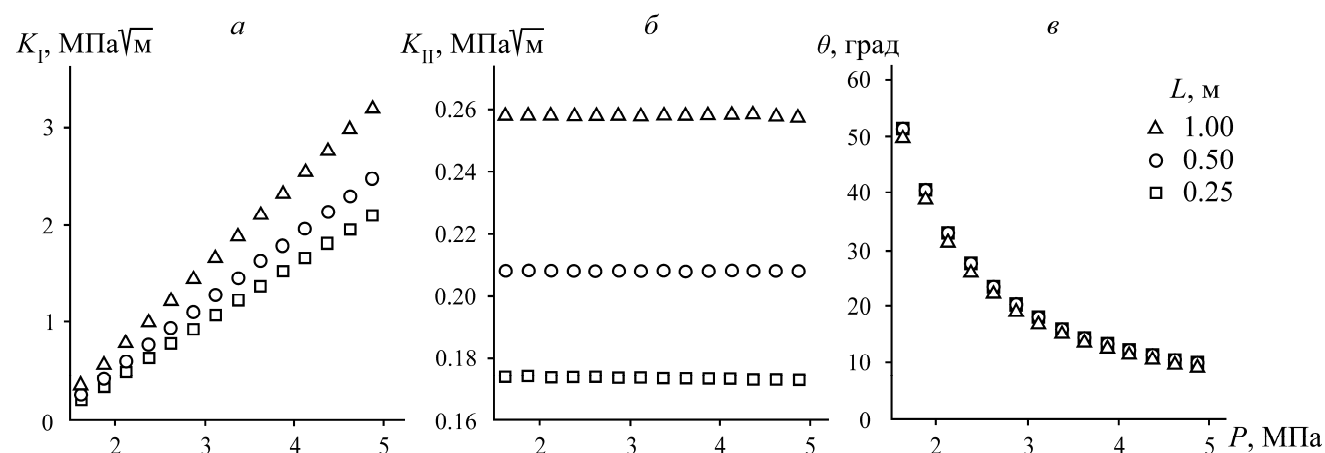


Рис. 5. Коэффициенты интенсивности напряжений  $K_I$  (а),  $K_{II}$  (б) и направление распространения трещины  $\theta$  (в) в зависимости от давления  $P$  при  $S_{yy} = 1.5$  МПа,  $\beta = 60^\circ$ ,  $\gamma_1 = 45^\circ$ ,  $L = 0.25, 0.50, 1$  м

Видно, что размеры трещины при одинаковой нагрузке  $P$  мало влияют на направление распространения разрыва. При уменьшении длины  $L$  значение  $K_{II}$  снижается, но вместе с ним падает и  $K_I$ , что приводит к незначительным изменениям угла  $\theta$ . Схожая ситуация наблюдается при изменении угла пересечения между скважинами  $\beta$ . В численных экспериментах выявлено, что при  $S_{yy} = 1.5$  МПа,  $\gamma_1 = 45^\circ$  и  $L = 1$  м уменьшение этого угла ведет к снижению как  $K_I$ , так и  $K_{II}$ , что в сумме при прочих равных условиях незаметно влияет на направление распространения трещины (рис. 6).

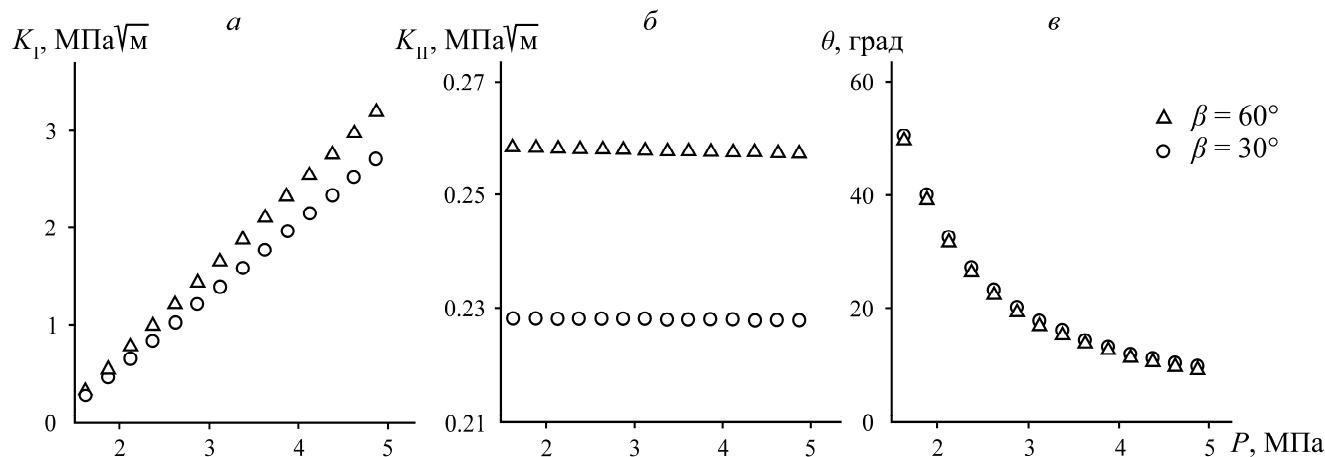


Рис. 6. Коэффициенты интенсивности напряжений  $K_I$  (*a*),  $K_{II}$  (*б*) и направление распространения трещины (*в*) в зависимости от давления  $P$  при  $L = 1$  м,  $S_{yy} = 1.5$  МПа,  $\gamma_1 = 45^\circ$  и угле между скважинами  $\beta = 30^\circ$  и  $60^\circ$

Из рис. 5*a* и 6*a* следует, что с ростом длины  $L$  и угла  $\beta$  значение  $K_I$  повышается, ведя к уменьшению давления разрыва, т. е. давление нагружения  $P$  скважин и трещины будет снижаться. При этом угол  $\theta$  должен расти (рис. 5*в*, 6*в*). На рис. 7 приведены зависимости этого угла от  $K_I$ . В диапазоне распространенных значений критического коэффициента интенсивности напряжений горных пород  $K_{Ic} = 0.5 - 1.5$  МПа $\sqrt{м}$  повышение  $L$  приводит к значительному увеличению угла распространения  $\theta$ . При  $K_{Ic} = 1.0$  МПа $\sqrt{м}$  и  $L = 0.25$  м он равен  $18.5^\circ$ , при  $L = 1$  м —  $26^\circ$ . Влияние угла пересечения скважин  $\beta$  существенно меньше (рис. 7*б*).

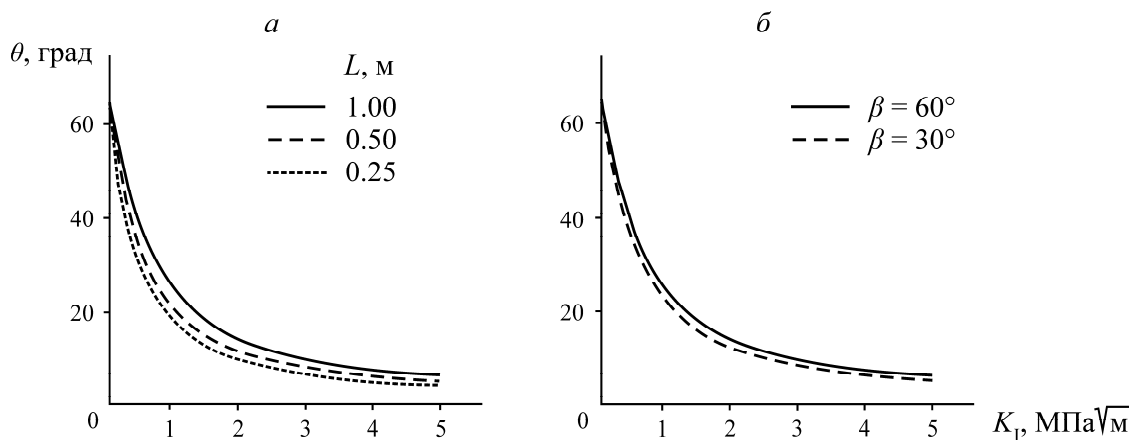


Рис. 7. Угол направления распространения трещины  $\theta$  в зависимости от  $K_I$  при  $S_{yy} = 1.5$  МПа,  $\gamma_1 = 45^\circ$ : *a* —  $\beta = 60^\circ$ ,  $L = 0.25, 0.50, 1$  м; *б* —  $\beta = 30^\circ, 60^\circ$ ,  $L = 1$  м

В следующем эксперименте меняли вертикальное напряжение  $S_{yy}$  при  $L = 1$  м,  $\beta = 60^\circ$ ,  $\gamma_1 = 45^\circ$  и давлении  $P$ , равном 2.5 и 5.0 МПа. Увеличение  $S_{yy}$  привело к значительному подъему  $K_{II}$  и угла распространения трещины  $\theta$  при незначительном снижении  $K_I$  (рис. 8).

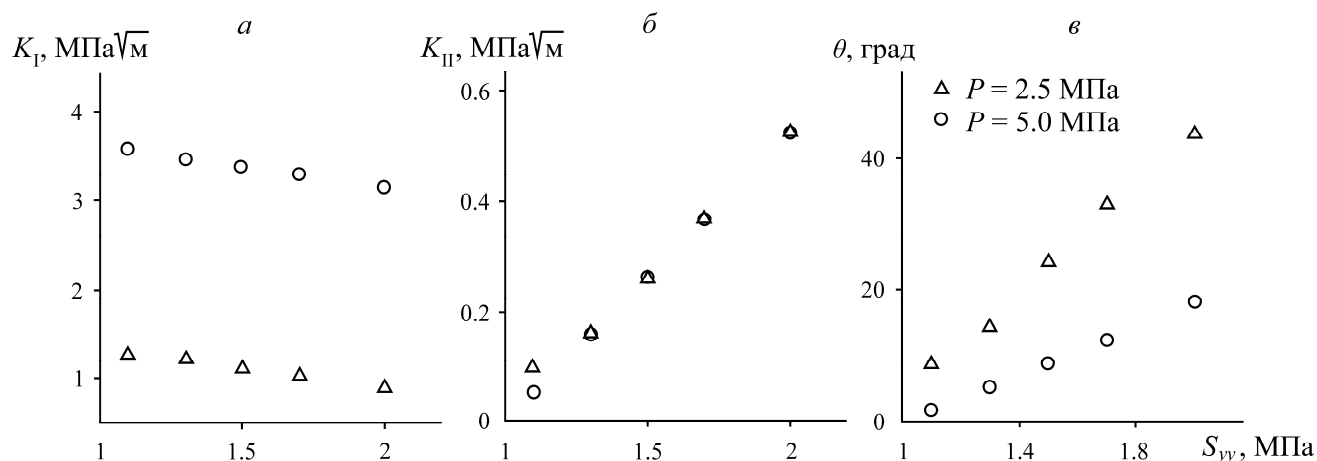


Рис. 8. Коэффициенты интенсивности напряжений  $K_I$  (а),  $K_{II}$  (б) и направление распространения трещины (в) в зависимости от вертикального напряжения  $S_{yy}$  при  $L = 1$  м,  $P = 2.5, 5.0$  МПа

Для оценки вклада растягивающих напряжений, создаваемых скважинами, на направление распространения трещины рассмотрены две задачи. В первой давление  $P$  прикладывали к скважинам и берегам трещин, во второй — только к трещине. На рис. 9 приведены результаты расчетов обеих задач при следующих параметрах:  $S_{yy} = 1.5$  МПа,  $\beta = 60^\circ$ ,  $\gamma_1 = 45^\circ$ ,  $L = 0.25, 0.50, 1$  м. Выявлено, что нагружение скважин давлением рабочей жидкости гидроразрыва заметно влияет на направление распространения трещины только при малых  $L \leq 0.5$  м (рис. 9а, б). Расстояние между скважинами по фронту трещины в этом случае меньше 0.46 м или 4.6 их диаметров. Без нагружения скважин угол  $\theta$  при  $L = 0.25$  м больше в 2 раза, при  $L = 0.50$  м — в 1.4 раза. С ростом  $L$  влияние скважин снижается, уже при  $L = 1$  м нагружением скважин давлением  $P$  можно пренебречь (рис. 9в).

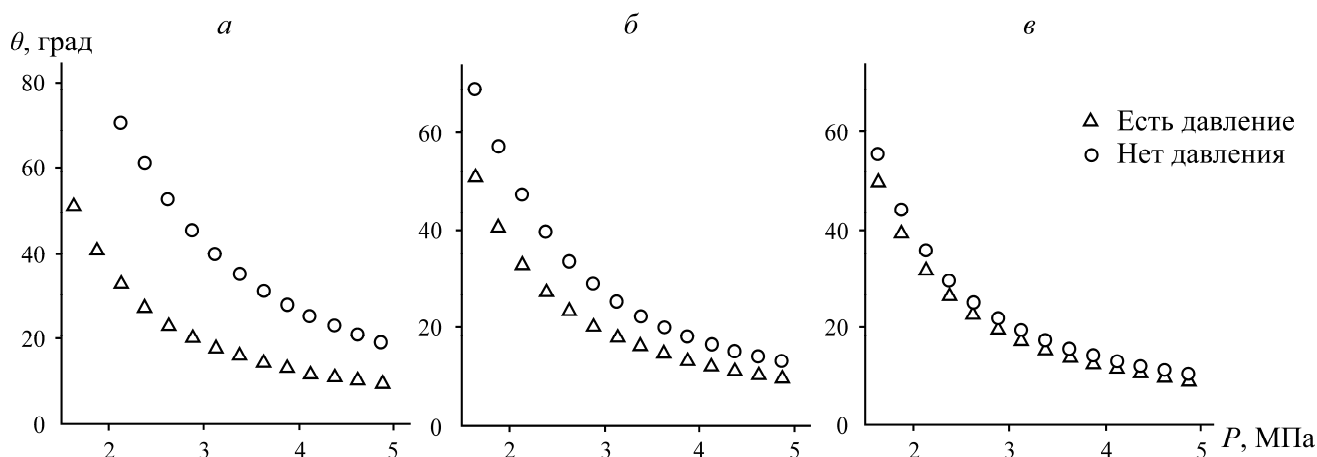


Рис. 9. Направление распространения трещины с нагрузкой стенки скважины давлением  $P$  и без нагрузки при  $L = 0.25$  (а),  $0.50$  (б) и  $1$  м (в)

Закончим рассмотрение статической задачи примером поворота плоскости скважин на угол  $\gamma_2$  вокруг оси симметрии 2 (см. рис. 1б). На рис. 10 приведены графики полученных значений  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  вдоль фронта трещины и в центре фронта в зависимости от давления  $P$  для  $L = 1$  м, и  $S_{yy} = 1.5$  МПа,  $\beta = 60^\circ$ ,  $\gamma_2 = 45^\circ$ . В этом случае наблюдаются сильные деформации кручения (III тип), т. е.  $K_{III}$  на порядок больше  $K_{II}$ .

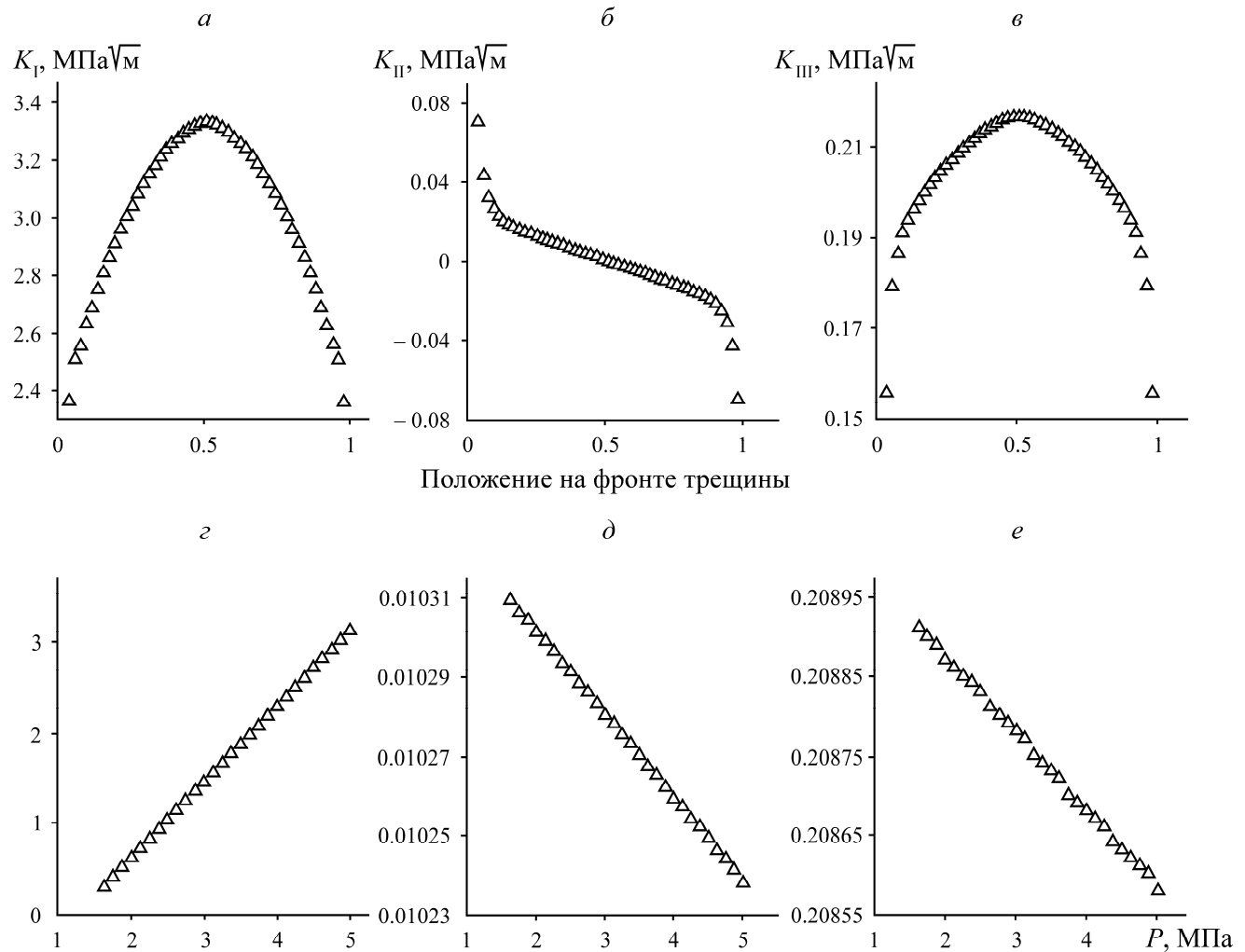


Рис. 10. Коэффициенты интенсивности напряжений: верхний ряд —  $K_I$  (а),  $K_{II}$  (б) и  $K_{III}$  (в) в зависимости от положения точки на фронте трещины при  $L = 1$  м,  $S_{yy} = 1.5$  МПа,  $\beta = 60^\circ$ ,  $\gamma_2 = 45^\circ$ ,  $P = 5$  МПа, по горизонтальной оси нормированное расстояние вдоль фронта трещины, где ноль и единица соответствуют точкам соединения трещины со скважинами; нижний ряд —  $K_I$  (з),  $K_{II}$  (д) и  $K_{III}$  (е) в зависимости от давления  $P$  на середине фронта трещины

При таких деформациях коэффициенты интенсивности напряжений сильно зависят от положения точки на фронте трещины, что приводит к различиям в них направления развития трещины, ее сложной итоговой форме (рис. 10а–в). Увеличение давления с 1 до 5 МПа ведет к росту  $K_I$  на порядок (рис. 10з), в то время как коэффициенты интенсивности напряжений  $K_{II}$  и  $K_{III}$  изменяются менее чем на 1 % (рис. 10д, е).

## РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА

Процесс развития трещин исследовался в квазистатическом приближении с помощью расширенного метода конечных элементов. Вместо пересекающихся скважин, показанных на рис. 1, рассматривалась тонкая щель X-образной формы, состоящая из двух ветвей шириной 0.1 м каждая с центром пересечения в точке  $x=y=z=5$  м (рис. 11). Такая упрощенная модель соответствует пересекающимся скважинам (скважинам с ответвлениями), на стенках которых имеются продольные щелевые вырезы в плоскости инициатора разрыва. Область распространения трещины представляет собой призму с основанием в виде равнобедренного треугольника и острым углом при вершине  $\beta$ , обозначенную на рис. 11 цифрой 1.

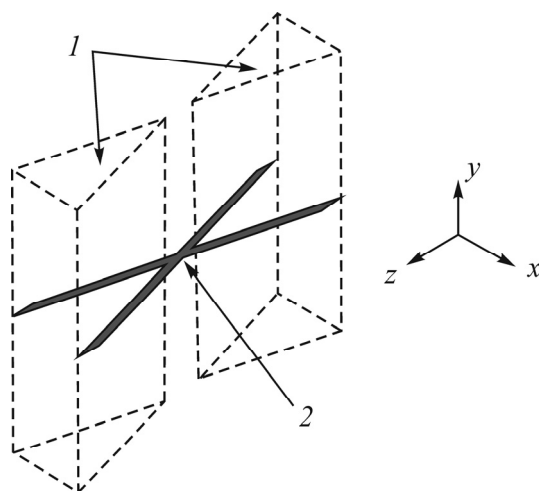


Рис. 11. Общий вид X-образной иницирующей щели (2) и область распространения трещины гидроразрыва (1)

Считаем, что среда однородна, линейно упруга, а поток жидкости внутри трещины и деформации связаны друг с другом уравнением неразрывности. Разрушение материала описывается когезионной моделью. Подробное описание применяемого подхода дано в [33].

Приняты следующие параметры материала и жидкости гидроразрыва: модуль упругости  $E=10$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu=0.3$ , критическая энергия разрушения  $G_c=120$  Н/м, прочность на растяжение  $\sigma_c=1$  МПа, динамическая вязкость  $\eta=0.001$  Па·с. Размеры расчетной области  $10 \times 10 \times 10$  м, угол пересечения между скважинами  $\beta=30^\circ, 60^\circ$ . Как и при исследовании статической задачи, вертикальное напряжение максимально, а плоскость иницирующей X-образной щели поворачивали на заданный угол  $\gamma$  (не более  $30^\circ$ ) вокруг одной из осей симметрии, указанных на рис. 1б. Таким образом плоскость инициатора не совпадает с энергетически выгодным направлением гидроразрыва. Границы расчетной области закреплены. В трещину подавался поток жидкости.

На рис. 12 приведены трехмерные изображения трещин, полученные при  $S_{yy}=1.1, 1.3$  и  $1.5$  МПа,  $\beta=60^\circ, \gamma_1=5^\circ$  (поворот вокруг оси 1). Из-за высокой вычислительной сложности расчет развития трещины в направлении  $z$  проводился на расстоянии до 1.5 м от центра иницирующей щели. На таком удалении расхождение между ветвями инициатора разрыва составляет  $\sim 0.8$  м.

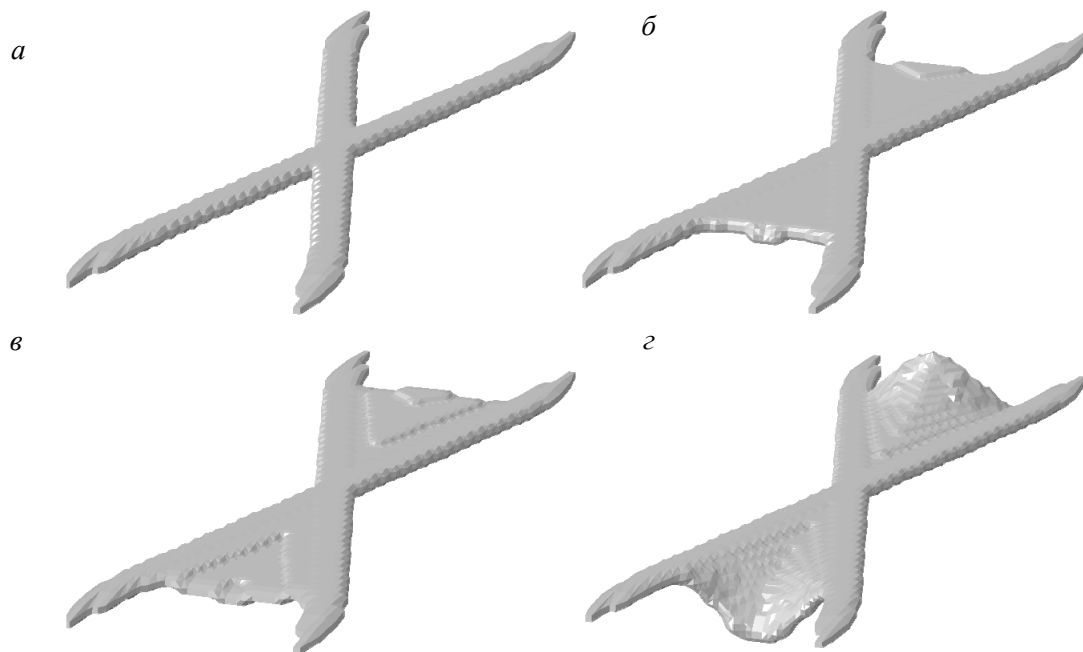


Рис. 12. Форма трещин гидроразрыва при  $\beta = 60^\circ$ ,  $\gamma_1 = 5^\circ$ ,  $S_{xx} = S_{zz} = 1$  МПа: *a* — иницирующая щель (инициатор разрыва); *б* —  $S_{yy} = 1.1$  МПа; *в* —  $S_{yy} = 1.3$  МПа; *г* —  $S_{yy} = 1.5$  МПа

На рис. 13 представлены сечения трещин из рис. 12 плоскостями  $XU$  при разных значениях  $z$  с шагом 0.2 м от центра иницирующей щели. В процессе распространения трещина прогибается, отклоняясь от плоскости заданной инициатором, причем прогиб увеличивается с повышением вертикального сжатия материала  $S_{yy}$ . Максимальное отклонение в экспериментах наблюдалось при верхних пределах тестируемых значений  $S_{yy}$ ,  $z$  и достигало 0.22 м (рис. 13г).

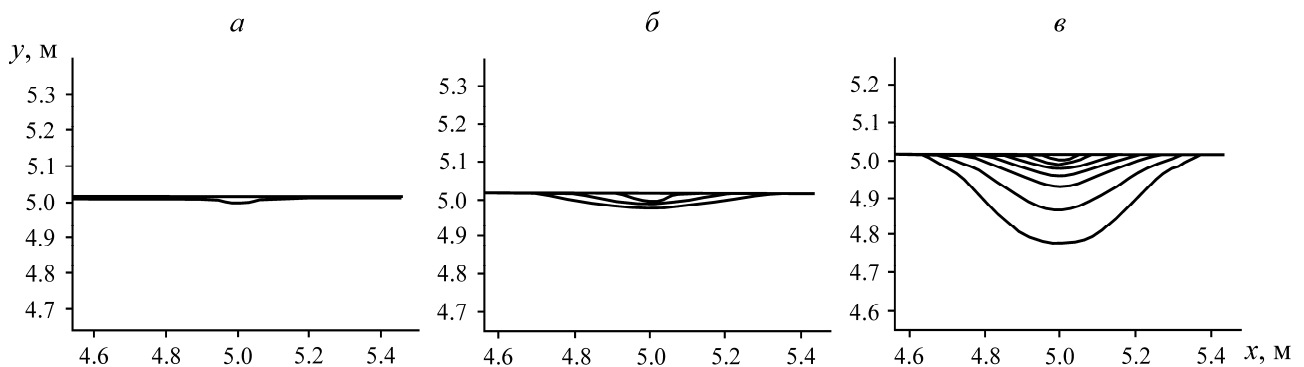


Рис. 13. Сечение трещин, приведенных на рис. 12, плоскостями  $XU$  при разных значениях  $z$  с шагом 0.2 м от центра иницирующей щели: *a* —  $S_{yy} = 1.1$  МПа; *б* —  $S_{yy} = 1.3$  МПа; *в* —  $S_{yy} = 1.5$  МПа

На рис. 14 показаны траектории трещин гидроразрыва в плоскости  $YZ$ ,  $x = 5$  м вдоль оси симметрии 2 (см. рис. 1б), рассчитанные при вертикальных сжатиях  $S_{yy} = 1.1, 1.3, 1.5$  МПа и разных углах поворота иницирующей щели вокруг оси симметрии 1, а именно при  $\gamma_1 = 2.5, 5, 15$  и  $30^\circ$ . Остальные параметры составляли:  $\beta = 60^\circ$ ,  $S_{xx} = S_{zz} = 1$  МПа.

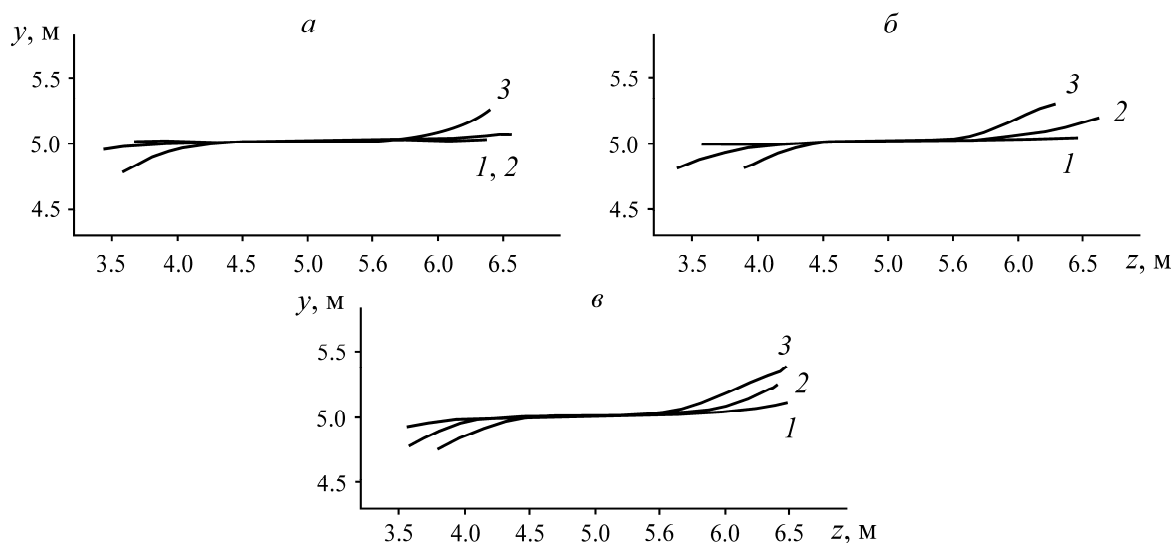


Рис. 14. Траектории трещин в плоскости  $YZ$ ,  $x=5$  при  $\beta=60^\circ$ ,  $S_{xx}=S_{zz}=1$  МПа при разных значениях вертикального напряжения  $S_{yy}$  и угла  $\gamma_1$  поворота: *а* —  $\gamma_1=5^\circ$ ,  $S_{yy}=1.1$  МПа (1),  $S_{yy}=1.3$  МПа (2),  $S_{yy}=1.5$  МПа (3); *б* —  $\gamma_1=15^\circ$ ,  $S_{yy}=1.1$  МПа (1),  $S_{yy}=1.3$  МПа (2),  $S_{yy}=1.5$  МПа (3); *в* —  $S_{yy}=1.5$  МПа,  $\gamma_1=2.5^\circ$  (1),  $\gamma_1=5^\circ$  (2),  $\gamma_1=30^\circ$  (3)

Отклонение трещины гидроразрыва от плоскости  $X$ -образной щели увеличивается с ростом вертикального напряжения, и в тестируемом диапазоне значений  $\gamma_1 \in [0; 30^\circ]$  оно больше при большем наклоне инициатора в сторону движения фронта трещины (рис. 14). При  $\gamma_1=5^\circ$  направление разрыва в расчетной области модели примерно совпадает с заданным вплоть до  $S_{yy}=1.3$  МПа (рис. 14*а*), при  $\gamma_1=15^\circ$  — только когда напряженное состояние среды близко к гидростатическому ( $S_{yy}=1.1$  МПа,  $S_{xx}=S_{zz}=1$  МПа) (рис. 14*б*). Увеличение угла  $\gamma_1 \in [0; 30^\circ]$  способствует уходу трещины из требуемой плоскости (рис. 14*в*).

Чтобы оценить, насколько эффективен инициатор  $X$ -образной формы, сравним его с дисковой щелью диаметром 0.2 м, равным максимальному размеру области пересечения ветвей  $X$ -образной щели при  $\beta=60^\circ$ . Траектории трещин в плоскости  $YZ$ ,  $x=5$  для дискового инициатора приведены на рис. 15*а*. Они рассчитаны при тех же значениях напряжений и угла  $\gamma_1$ , что и на рис. 14*а*. Видно, что  $X$ -образная щель лучше ориентирует разрыв в своей плоскости, чем дисковая. Это отчетливо демонстрирует рис. 15*б*, на котором представлены траектории трещин от обоих инициаторов, когда  $S_{yy}=1.3$  МПа,  $S_{xx}=S_{zz}=1$  МПа,  $\gamma_1=5^\circ$ .

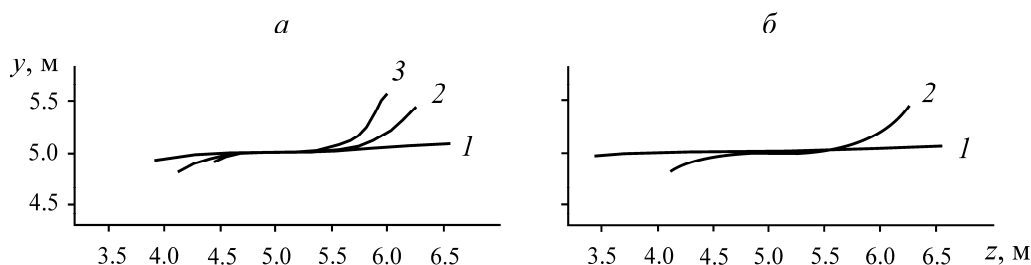


Рис. 15. Траектории развития трещин гидроразрыва в плоскости  $YZ$ ,  $x=5$  для щелевых инициаторов  $X$ -образной и дисковой форм при  $S_{xx}=S_{zz}=1$  МПа,  $\gamma_1=5^\circ$ : *а* — дисковый инициатор,  $S_{yy}=1.1$  МПа (1),  $S_{yy}=1.3$  МПа (2),  $S_{yy}=1.5$  МПа (3); *б* —  $S_{yy}=1.3$  МПа,  $X$ -образный инициатор (1), дисковый инициатор (2)

Рассмотрим случай, когда  $X$ -образный щелевой инициатор повернут на угол  $\gamma_2$  вокруг оси симметрии 2, т. е. в плоскости параллельной фронту разрыва в момент его инициирования (рис. 16б). На рис. 16а показан трехмерный вид трещины, образующейся при  $\gamma_2 = 5^\circ$ ,  $\beta = 60^\circ$ ,  $S_{xx} = S_{zz} = 1$  МПа и  $S_{yy} = 1.5$  МПа. В отличие от ранее рассматриваемого разрыва, который выполнялся хоть и при тех же напряжениях и угле наклона инициатора, но при повороте вокруг оси симметрии 1 (рис. 14а, кривая 3), полученная трещина практически полностью лежит в заданной плоскости. Это видно по траектории разрыва в плоскости  $XY$ ,  $z = 3.6$  м (удаление от центра пересечения ветвей инициатора 1.4 м), приведенной на рис. 16в. В середине этой траектории имеется изгиб, связанный с деформациями кручения, играющими заметную роль при малых  $L$ . Повышение  $\gamma_2$  до  $15^\circ$  и  $S_{yy}$  до 2 МПа приводит к распаду разрыва на две ветви, одна из которых развивается вверх, другая — вниз (рис. 16б). На рис. 16д показаны сечения получаемых трещин плоскостями  $XY$  при разных  $z$  с шагом 0.2 м от центра инициатора. После разделения обе ветви сначала растут одновременно, затем одна из них (в данном примере верхняя) становится доминирующей и дальнейший рост трещины происходит только по ней.

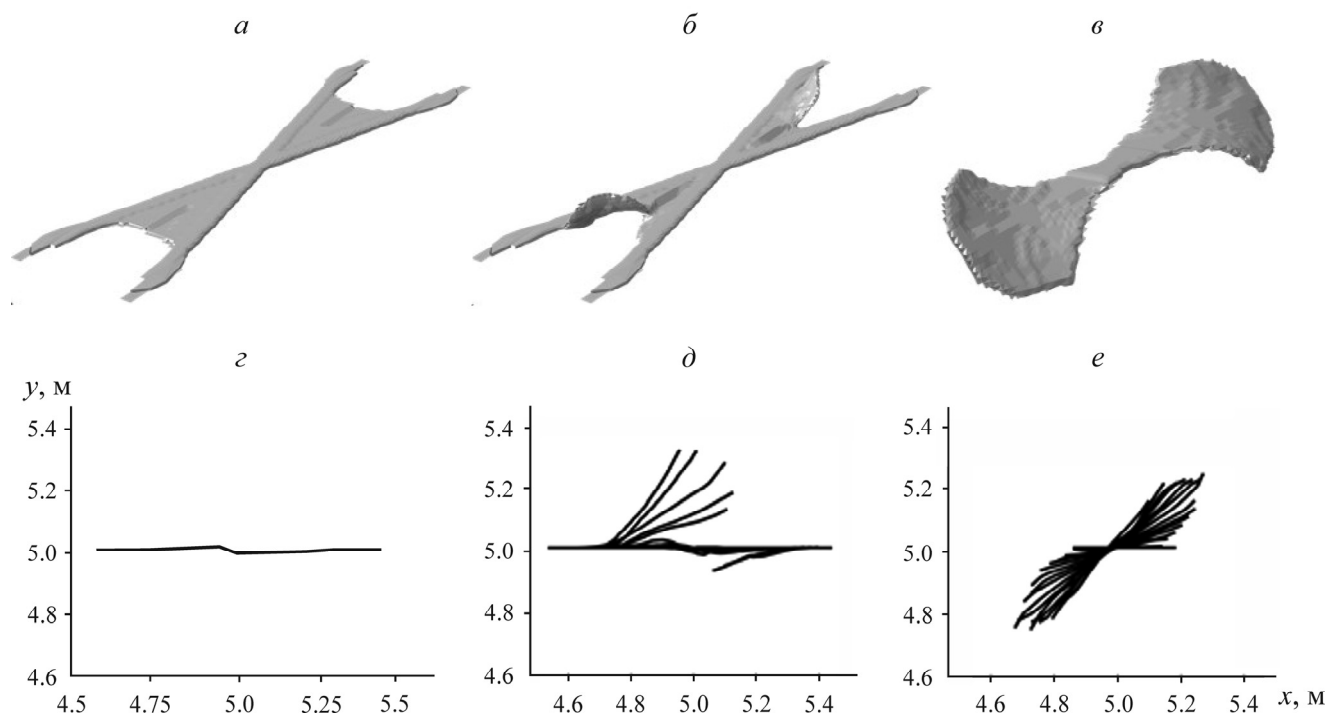


Рис. 16. Трехмерный вид (а–в) и сечения трещин плоскостями  $XY$  (г–д) для  $X$ -образного и дискового щелевых инициаторов разрыва при  $S_{xx} = S_{zz} = 1$  МПа,  $\beta = 60^\circ$ : а, г —  $X$ -образный инициатор,  $\gamma_2 = 5^\circ$ ,  $S_{yy} = 1.5$  МПа, сечение при  $z = 3.6$  м; б, д —  $X$ -образный инициатор,  $\gamma_2 = 15^\circ$ ,  $S_{yy} = 2$  МПа, сечения при разных  $z$  с шагом 0.2 м; в, е — дисковый инициатор,  $\gamma_2 = 5^\circ$ ,  $S_{yy} = 1.5$  МПа, сечения при разных  $z$  с шагом 0.2 м

Для сравнения на рис. 16в приведена трещина от дискообразного щелевого инициатора, рассчитанная при тех же условиях ( $\gamma_2 = 5^\circ$ ,  $\beta = 60^\circ$ ,  $S_{xx} = S_{zz} = 1$  МПа,  $S_{yy} = 1.5$  МПа), что и разрыв на рис. 16а. Хорошо видны винтообразная форма образующейся трещины, отсутствие в ней разрывов сплошности, быстрая потеря заданной плоскости развития (рис. 16в, е). Полученные результаты показывают преимущество  $X$ -образного щелевого инициатора перед дисковым в задаче управления ориентацией гидроразрыва в неоднородно сжатом породном массиве.

## ВЫВОДЫ

Разработана методика расчетов и проведены численные исследования траектории развития трещин при выполнении гидроразрыва в скважинах с ответвлениями. Установлено влияние геометрических параметров инициатора разрыва и неоднородности напряженного состояния среды на направление развития и форму образующихся трещин.

Нагружение скважин давлением рабочей жидкости гидроразрыва заметно влияет на направление распространения коротких трещин. С увеличением их длины действие скважин снижается, а уже начиная с длины несколько десятков сантиметров – нескольких метров, внутренним нагружением стенок скважин можно пренебречь.

В ходе моделирования разрывов в квазистатическом приближении выявлено, что по мере своего распространения трещина прогибается, отклоняясь от плоскости инициатора. Прогиб увеличивается с ростом максимального напряжения и его отклонения от нормали к плоскости инициатора в сторону начального распространения трещины. Если максимальное напряжение направлено поперек начальному направлению роста трещины, то происходит ее винтообразное закручивание. При малых отклонениях трещина развивается стабильно в плоскости X-образного инициатора даже при относительно высокой неоднородности поля напряжений. При увеличении отклонения и максимального сжатия среды трещина разделяется на две ветви, развивающиеся в противоположных направлениях. Одна из них вскоре становится доминирующей, и дальнейший рост трещины происходит только по ней.

Сравнение траекторий развития трещин вблизи X-образного инициатора, моделирующего ответвления и пересечение скважин, с дисковой щелью показывает его преимущество при решении задач локального управления ориентацией гидроразрыва в неоднородно сжатом породном массиве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang J., Liu B., Bian W., Chen K., Wang H., and Cao C. Application cumulative tensile explosions for roof cutting in Chinese underground coal mines, Arch. Min. Sci., 2021, Vol. 66. — P. 421–435.
2. Sun Y., Fu Y., and Wang T. Field application of directional hydraulic fracturing technology for controlling thick hard roof: A case study, Arab. J. Geosci., 2021, Vol. 14, No. 438. — P. 1–15.
3. Кочетков Л. М., Журба В. Н., Малышев Г. А., Желудков А. В. Применение “струйного” ГРП на месторождениях ОАО “Сургутнефтегаз” // Бурение и нефть. — 2009. — № 1. — С. 27–29.
4. Yokoyama T., Ogawa K., Sano O., Hirata A., and Mizuta Y. Development of borehole-jack fracturing technique and in situ measurements, Rock Stress and Earthquakes, Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, 2010. — P. 93–100.
5. Pavlov V. A., Serdyukov S. V., Martynyuk P. A., and Patutin A. V. Optimisation of borehole-jack fracturing technique for in situ stress measurement, Int. J. Geotech. Eng., 2019, Vol. 13, No. 5. — P. 451–457.
6. Пат. 2522677 РФ. Способ направленного гидроразрыва массива горных пород (приоритет от 27.09.2012 г.) / С. В. Сердюков, А. В. Патутин, А. С. Сердюков, Т. В. Шилова // Оpubл. в БИ. — 2014. — № 20.
7. Ma L., Fauchille A. L., Chandler M. R., Dowe P., Taylor K. G., Mecklenburgh J., and Lee P. D. In-situ synchrotron characterisation of fracture initiation and propagation in shales during indentation, Energy, 2021, Vol. 215. — 119161.

8. **Patutin A. and Serdyukov S.** Transverse hydraulic fracture initiation by indentation in an uncased borehole, *Procedia Eng.*, 2017, Vol. 191. — P. 287–290.
9. **Chuprakov D., Melchaeva O., and Prioul R.** Injection-sensitive mechanics of hydraulic fracture interaction with discontinuities, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2014, Vol. 47, No. 5. — P. 1625–1640.
10. **Liu Z., Wang S., Ye H., Yang L., Feng F., Lian H., and Yang D.** Experimental study on the effects of pre-cracks, fracturing fluid, and rock mechanical characteristics on directional hydraulic fracturing with axial pre-cracks, *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 2021, Vol. 7, No. 2. — P. 29.
11. **Deng B., Yin G., Li M., Zhang D., Lu J., Liu Y., and Chen J.** Feature of fractures induced by hydro-fracturing treatment using water and L–CO<sub>2</sub> as fracturing fluids in laboratory experiments, *Fuel*, 2018, Vol. 226. — P. 35–46.
12. **Fallahzadeh S. H., Hossain M. M., James Cornwell A., and Rasouli V.** Near wellbore hydraulic fracture propagation from perforations in tight rocks: the roles of fracturing fluid viscosity and injection rate, *Energies*, 2017, Vol. 10, No. 3. — 359.
13. **Guanhua N., Hongchao X., Zhao L., Lingxun Z., and Yunyun N.** Improving the permeability of coal seam with pulsating hydraulic fracturing technique: a case study in Changping coal mine, China, *Process Saf. Environ. Prot.*, 2018, Vol. 117. — P. 565–572.
14. **Fu H., Zhang F., Weng D., Liu Y. et al.** The simulation method research of hydraulic fracture initiation with perforations, *Proceedings of IFEDC 2018, Springer Series in Geomech. and Geoengin.*, 2018. — P. 1229–1240.
15. **Duane C., Uhri et al.** Creation of multi-azimuth permeable hydraulic fracturing, U. S. Patent No. 4834181, 1989.
16. **Sobhaniragh B., Mansur W. J., and Peters F. C.** The role of stress interference in hydraulic fracturing of horizontal wells, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2018, Vol. 106. — P. 153–164.
17. **Ren X., Zhou L., Zhou J., Lu Z., and Su X.** Numerical analysis of heat extraction efficiency in a multi-lateral-well enhanced geothermal system considering hydraulic fracture propagation and configuration, *Geothermics*, 2020, Vol. 87. — 101834.
18. **Liu Y., Xia B., and Liu X.** A novel method of orienting hydraulic fractures in coal mines and its mechanism of intensified conduction, *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2015, Vol. 27. — P. 190–199.
19. **Zhao X., Huang B., and Xu J.** Experimental investigation on the characteristics of fractures initiation and propagation for gas fracturing by using air as fracturing fluid under true triaxial stresses, *Fuel*, 2019, Vol. 236. — P. 1496–1504.
20. **Пат. 2401943 РФ.** Способ проведения направленного гидроразрыва пласта в двух горизонтальных стволах скважины (приоритет от 20.10.2010 г.) / О. П. Турецкий, В. П. Турецкий, В. Н. Федоров, С. С. Ключкин // Оpubл. в БИ. — 2010. — № 29.
21. **Yang T., Zhu W., Yu Q., and Liu H.** The role of pore pressure during hydraulic fracturing and implications for groundwater outbursts in mining and tunneling, *Hydrogeol. J.*, 2011, Vol. 19, No. 5. — P. 995–1008.
22. **Song C., Lu Y., Tang H., and Jia Y.** A method for hydrofracture propagation control based on non-uniform pore pressure field, *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2016, Vol. 33. — P. 287–295.
23. **Пат. 2591999 РФ.** Способ ориентирования трещин гидравлического разрыва в подземном пласте, вскрытом горизонтальными стволами (приоритет от 21.04.2015 г.) / Ф. Д. Кучук, Б. Тевени, А. А. Осипцев, К. К. Бутула // Оpubл. в БИ. — 2016. — № 20.
24. **Azarov A., Patutin A., and Serdyukov S.** Hydraulic fracture propagation near the cavity in a poroelastic Media, *Appl. Sci.*, 2021, Vol. 11, No. 22. — 11004.

25. **Zhang F., Wang X., Bai J., Wu W., Wu B., and Wang G.** Fixed-length roof cutting with vertical hydraulic fracture based on the stress shadow effect: A case study, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2022, Vol. 32, No. 2. — P. 295–308.
26. **Zhang T., Zhao J., Liu Y., and Yu F.** Evolution and management of thick-hard roof using goaf-based multistage hydraulic fracturing technology — a case study in western Chinese coal field, *Arabian J. Geosci.*, 2021, Vol. 14, No. 10. — 876.
27. **Shilova T. and Serdyukov S.** Permeability of coking coals and patterns of its change in Leninsky area, Kuznetsk Coal Basin, Russia, *Appl. Sci.*, 2021, Vol. 11, No. 9. — 3969.
28. **Сердюков С. В., Курления М. В., Рыбалкин Л. А., Шилова Т. В.** Влияние гидроразрыва угля на фильтрационное сопротивление зоны дренирования дегазационной скважины // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 3–13.
29. **Патутин А. В., Азаров А. В., Рыбалкин Л. А., Дробчик А. Н., Сердюков С. В.** Устойчивость развития трещины гидроразрыва между двумя параллельными скважинами гидроразрыва угля на фильтрационное сопротивление зоны дренирования дегазационной скважины // ФТПРПИ. — 2022. — № 2. — С. 34–44.
30. **Lu W. and He C.** Numerical simulation of the fracture propagation of linear collaborative directional hydraulic fracturing controlled by pre-slotted guide and fracturing boreholes, *Eng. Fract. Mech.*, 2020, Vol. 235. — 107128.
31. **Cheng Y., Lu Z., Du X., Zhang X., and Zeng M.** A crack propagation control study of directional hydraulic fracturing based on hydraulic slotting and a nonuniform pore pressure field, *Geofluids*, 2020, Article ID 8814352.
32. **Пат. 2730688 РФ.** Способ направленного гидроразрыва угольного пласта (приоритет от 09.12.2019) / С. В. Сердюков, А. В. Патутин, А. В. Азаров, Л. А. Рыбалкин, Т. В. Шилова // Оpubл. в БИ. — 2020. — № 24.
33. **Азаров А. В., Курления М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В.** Особенности развития трещины гидроразрыва вблизи свободной поверхности в изотропной пороупругой среде // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 3–11.

*Поступила в редакцию 13/VII 2022*

*После доработки 02/IX 2022*

*Принята к публикации 21/IX 2022*