

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.234.573

УСТОЙЧИВОСТЬ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА МЕЖДУ ДВУМЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ СКВАЖИНАМИ

А. В. Патутин, А. В. Азаров, Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик, С. В. Сердюков

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

Приведены результаты численного моделирования распространения начальной трещины, созданной между двумя параллельными скважинами в изотропной среде в неоднородном поле напряжений. Исследованы траектории разрыва при различных отклонениях начальной трещины от направления осей скважин, расстояния между ними и поля сжимающих напряжений. Выполнено физическое моделирование гидроразрыва в крупноразмерных образцах.

Гидравлический разрыв, поле напряжений, трещина, параллельные скважины, математическое моделирование, физический эксперимент

DOI: 10.15372/FTPRPI20220204

Метод гидравлического разрыва пласта получил широкое распространение при подземном строительстве и разработке твердых полезных ископаемых. В шахтных условиях гидроразрыв применяется для измерения напряжений, действующих в массиве [1, 2], увеличения газоотдачи угольных пластов [3–5], контролируемого обрушения кровли [6, 7], формирования противофильтрационных завес вблизи выработок [8]. Для эффективного решения большинства обозначенных задач требуется создание протяженных трещин определенной направленности.

Известны различные подходы для реализации направленного гидроразрыва пласта. К ним относится нарезка инициирующих щелей заданной геометрии, направленная нагрузка на стенки скважины посредством специальных устройств, создание благоприятного для распространения разрыва локального поля напряжений вблизи скважины, в том числе за счет других скважин, пробуренных в ее окрестности. Одна из актуальных технологических задач — формирование протяженной продольной трещины в пласте, например за счет синхронного гидроразрыва

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области (проект № 20-45-540005).

Геомеханические исследования керна проведены с использованием оборудования ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН.

нескольких близкорасположенных параллельных скважин. Существуют факторы, препятствующие их объединению в единую систему трещиной гидроразрыва: действующие в массиве напряжения с учетом влияния горной выработки, физические свойства породы, расстояние между скважинами, наличие и геометрические параметры инициирующих щелей, скорость подачи и свойства рабочей жидкости и др.

В последние годы наблюдается научный интерес к исследованию данной проблемы. По результатам численного и физического моделирования установлены особенности распространения трещин в крупногабаритных образцах в зависимости от расстояния между скважинами, их положения относительно действующих напряжений, минимальных и максимальных сжимающих нагрузок [9, 10]. В [11, 12] для управления траекторией разрыва предлагается дополнительно повышать поровое давление в среде посредством закачки жидкости через вспомогательные скважины, а также комбинировать такой подход с созданием инициирующих щелей в скважинах гидроразрыва.

Известно, что наличие направленной нарезки, выполненной на стенках параллельных скважин, влияет на траекторию трещин. Для моделирования гидроразрыва скважины, содержащей инициирующую щель, использовался гибридный метод конечно-дискретных элементов [13, 14]. Оценено влияние ориентации и длины щели, скорости закачки рабочей жидкости и действующих напряжений на распространение разрыва в одной и нескольких скважин. Полученные результаты хорошо согласуются с данными лабораторных экспериментов.

Приведены результаты численных и физических исследований процесса распространения трещины гидроразрыва в трех параллельных скважинах с выполненными нарезками определенной направленности и отмечается перспективность предлагаемого подхода для управления трещиной гидроразрыва [15, 16]. Указывается, что при определенных параметрах задачи: угле между направлением действия максимального горизонтального напряжения σ_H и рядом скважин более 30° и $(\sigma_H - \sigma_h) / \sigma_h > 0.5$, где σ_h — вертикальное напряжение, происходит быстрый разворот трещины в сторону действия σ_H . В [17] рассмотрена задача формирования единой трещины гидроразрыва из пяти параллельных скважин в плоской постановке.

Цель настоящей работы — численное исследование распространения начальной трещины в изотропной среде неоднородного поля напряжений между двумя параллельными скважинами и проведение физического моделирования синхронного гидроразрыва в крупноразмерных искусственных образцах. Начальная трещина в численной модели располагалась под углом к оси скважин, позволяя исследовать устойчивость распространения разрыва вдоль их стенок в зависимости от различных параметров задачи.

ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОРАЗРЫВА

Математическое моделирование гидроразрыва выполнено в трехмерной постановке с помощью расширенного метода конечных элементов XFEM, реализованного в программном комплексе ABAQUS [18–20]. При помощи данного метода получают решения, включающие скачок перемещений, с помощью разрывных функций, а вблизи вершины трещины — с помощью специальных асимптотических функций. Такой подход позволяет моделировать процесс развития трещины в направлении, которое определяется из анализа напряженного состояния в окрестности ее вершины. Использовалась реализация XFEM, основанная на фантомных узлах и когезионном законе разрушения [18, 21].

В расчетах использовалась область $10 \times 10 \times 10$ м, содержащая две параллельные скважины диаметром 0.1 м, соединенные между собой начальной трещиной длиной l , имеющей отклонение α к оси скважин. Для $\alpha = 2.5^\circ$ и 5° принималось $l = 0.5$ м, для $\alpha = 10^\circ$ — $l = 0.2$ м с целью предотвращения ошибок в расчете траектории трещины из-за ее значительного изгиба по стенке скважины. Направление скважин совпадало с осью z , расстояние между ними равнялось d . Минимальный размер элемента при расчетах 0.015 м. На внешней границе области заданы сжимающие напряжения S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} . Модуль упругости среды $E = 10$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, динамическая вязкость жидкости $\eta = 0.001$ Па·с, критическая энергия разрушения $G_c = 120$ Н/м, прочность на растяжение $\sigma_c = 1$ МПа. Геометрические параметры среды и граничные условия задачи приведены на рис. 1.

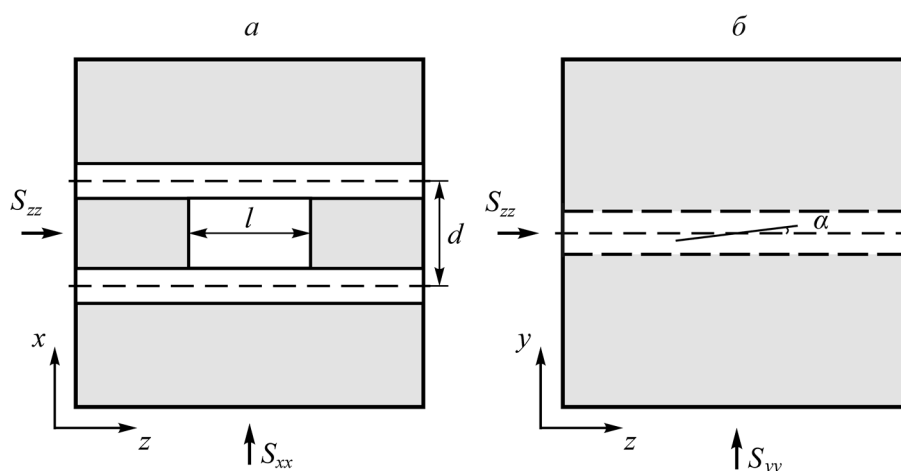


Рис. 1. Параметры расчетной области среды в центральных сечениях xOz (а) и yOz (б): d — расстояние между скважинами; l — длина начальной трещины; α — угол между начальной трещиной и осью скважин; S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} — нормальные нагрузки на гранях кубической модели

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотрим две параллельные скважины, находящиеся на расстоянии $d = 0.5$ м друг от друга. На рис. 2а приведена рассчитанная трехмерная трещина при ее начальном отклонении $\alpha = 10^\circ$ в гидростатическом поле сжатия $S_{xx} = S_{yy} = S_{zz} = 1.0$ МПа, на рис. 2в — пересечение данной трещины с плоскостью симметрии $x = 5$ м, расположенной между двумя скважинами, и с поверхностью скважины, на рис. 2г — линии пересечения трещины с плоскостями $z = 4.0, 4.6$ и 5.0 м. Рис. 2б, д, е построены аналогично. Здесь использовались следующие параметры: $\alpha = 5^\circ$; поле сжатия $S_{xx} = S_{zz} = 3.0$ МПа, $S_{yy} = 4.5$ МПа; $z = 4.36, 4.45, 4.51, 4.60$ и 5.00 м. Выявлено, что в случае гидростатического поля трещина преимущественно распространяется вдоль скважин. Если вертикальное напряжение превышает горизонтальные, даже при относительно небольшом угле отклонения 5° трещина переориентируется перпендикулярно плоскости скважин.

На рис. 3 показаны пересечения трещин с плоскостью симметрии $x = 5$ м (рис. 3а) и с плоскостью $z = 6$ м (рис. 3б) при разных углах α в гидростатическом поле сжатия 1 МПа. С ростом α прогиб трещины между скважинами увеличивается (см. рис. 3б). При малых углах α трещины быстрее ориентируются параллельно плоскости скважин и далее распространяются в этом направлении.

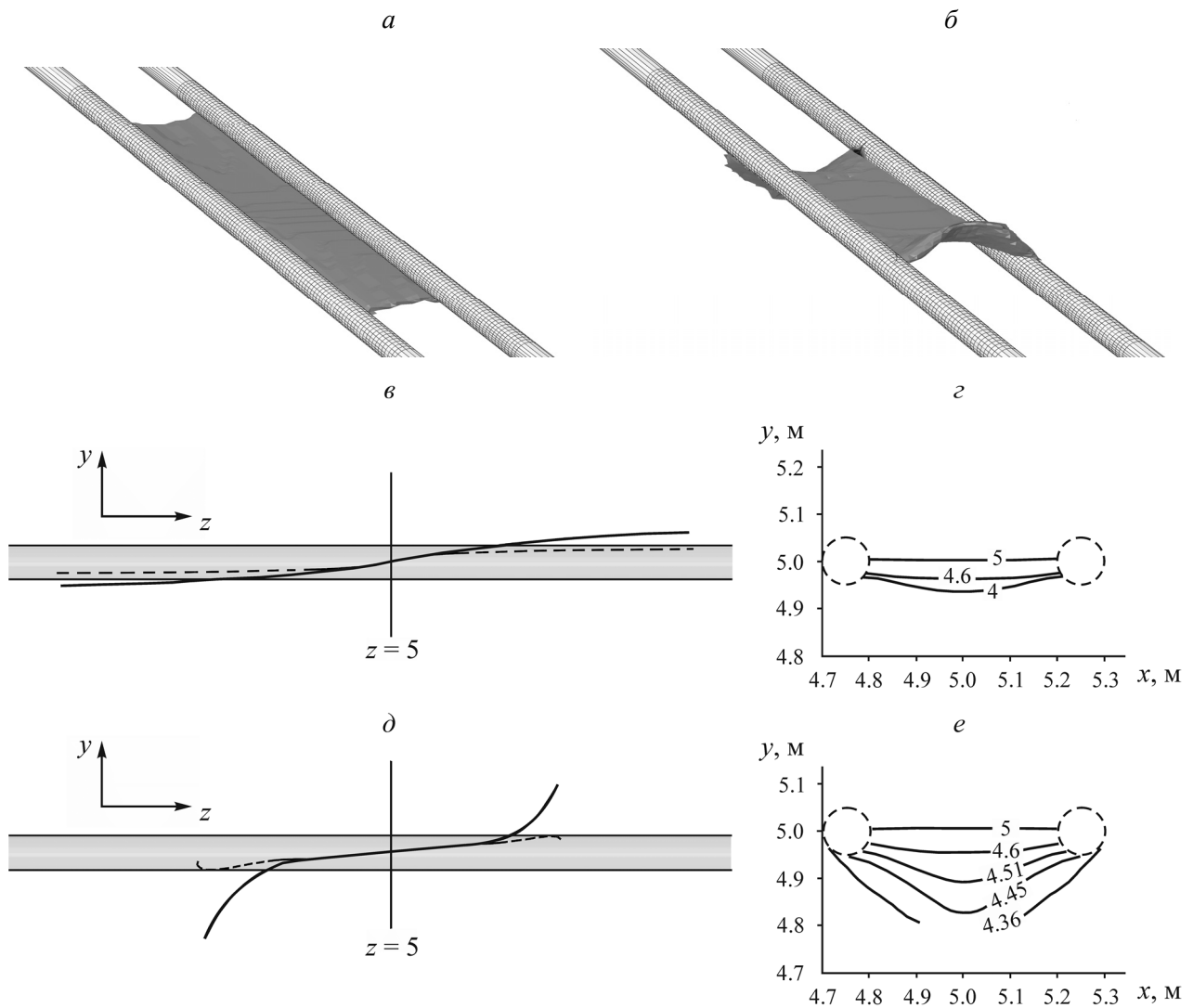


Рис. 2. Форма трещин гидроразрыва между параллельными скважинами, расположенными на расстоянии 0.5 м друг от друга: *а* — гидростатическое сжатие $S_{xx}=S_{yy}=S_{zz}=1.0$ МПа, $\alpha=10^\circ$; *б* — $S_{xx}=S_{zz}=3.0$ МПа, $S_{yy}=4.5$ МПа, $\alpha=5^\circ$; *в, д* — пересечение трещин с плоскостью симметрии $x=5$ м (сплошная линия) и со скважиной (штриховая); *г, е* — пересечение трещин с различными плоскостями z

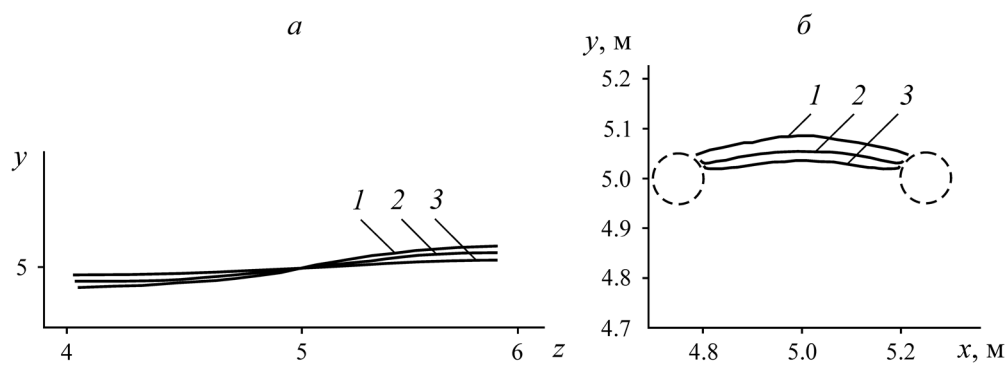


Рис. 3. Пересечение трещины с плоскостью симметрии $x=5$ м (*а*) и плоскостью $z=6$ м (*б*) в условиях гидростатического сжатия $S_{xx}=S_{yy}=S_{zz}=1.0$ МПа при $\alpha=10^\circ$ (1), 5° (2) и 2.5° (3)

На рис. 4 показаны пересечения трещин с плоскостью симметрии $x=5$ м (рис. 4а) и с плоскостью $z=5.5$ м (рис. 4б) при $\alpha = 5^\circ$ и двух вариантах неоднородного поля в среде: $S_{xx}=S_{zz}=3.0$ МПа, $S_{yy}=4.5$ МПа и $S_{xx}=S_{zz}=1.0$ МПа, $S_{yy}=1.5$ МПа. Соотношение между максимальными и минимальными сжимающими напряжениями сохранилось, но сами напряжения уменьшались по отношению к прочности материала на растяжение σ_c . Установлено, что при больших напряжениях относительно σ_c трещина быстрее переориентируется в направлении перпендикулярном к плоскости скважин.

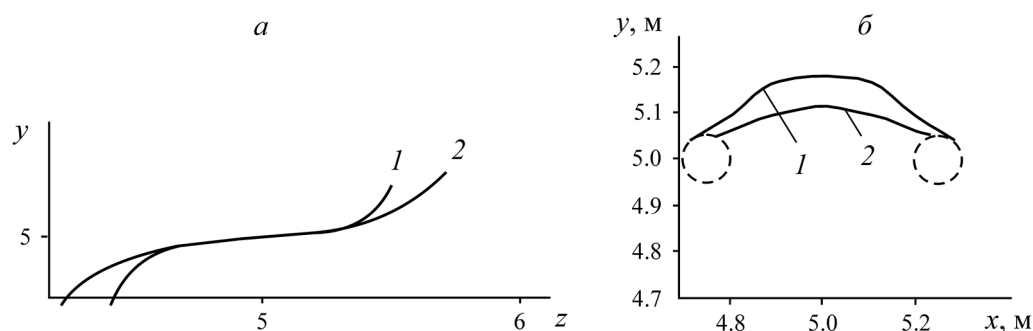


Рис. 4. Пересечение трещины с плоскостью симметрии $x=5$ м (а) и плоскостью $z=5.5$ м (б) при $\alpha = 5^\circ$ в случае неоднородного поля напряжения: 1 — $S_{xx}=S_{zz}=3.0$ МПа; $S_{yy}=4.5$ МПа; 2 — $S_{xx}=S_{zz}=1.0$ МПа, $S_{yy}=1.5$ МПа

На рис. 5 отражены пересечения трещин с плоскостью симметрии $x=5$ м (рис. 5а) и с плоскостью $z=5.7$ м (рис. 5б) при $\alpha = 10^\circ$ и гидростатическом сжатии среды 1 МПа для расстояний между центрами скважин $d=0.50$ и 0.25 м. Выявлено, что уменьшение расстояния d приводит к меньшим отклонениям трещины от плоскости, соединяющей центры скважин.

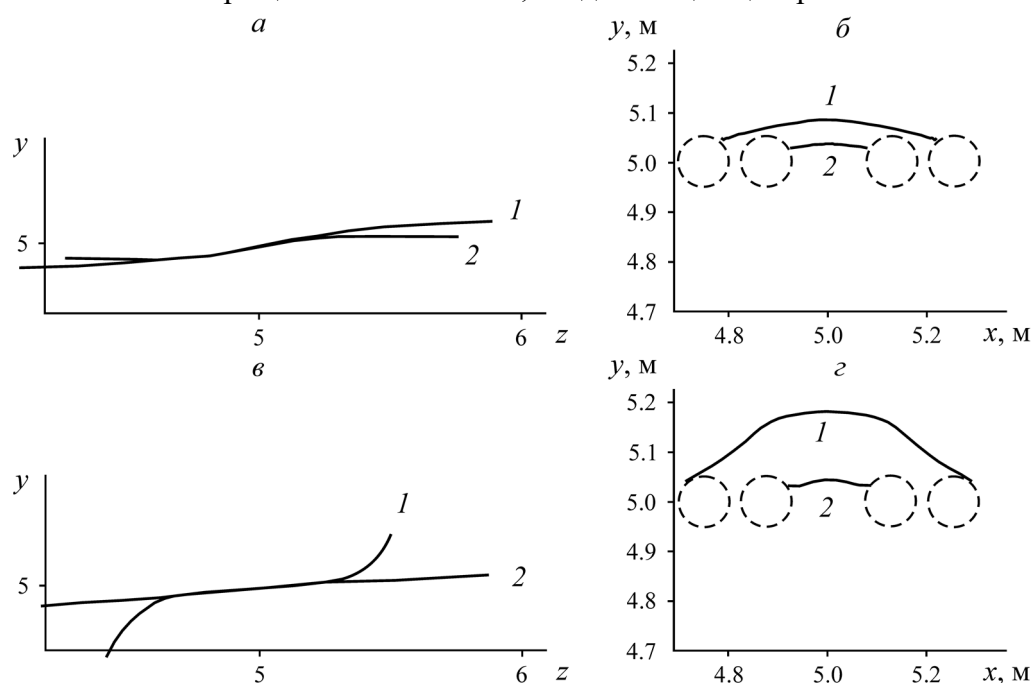


Рис. 5. Пересечение трещины с плоскостью симметрии $x=5$ м (а) и плоскостью $z=5.7$ м (б) при $\alpha = 10^\circ$ и гидростатическом сжатии $S_{xx}=S_{yy}=S_{zz}=1.0$ МПа для расстояний между скважинами 0.50 (1) и 0.25 м (2); пересечение трещины с плоскостью симметрии $x=5$ м (в) и плоскостью $z=5.5$ м (г) при $\alpha = 10^\circ$ и напряжениях $S_{xx}=S_{zz}=3.0$ МПа, $S_{yy}=4.5$ МПа для $d=0.50$ (1) и 0.25 м (2)

Зависимости на рис. 5в, г построены аналогичным образом, для этого использовались следующие параметры: поле сжатия $S_{xx} = S_{zz} = 3.0$ МПа, $S_{yy} = 4.5$ МПа, $z = 5.5$ м. Установлено, что при $d = 0.25$ м наблюдается значительно меньший прогиб трещины, однако в отличие от случая гидростатического сжатия, удержания трещины в плоскости, соединяющей центры скважин, не происходит и она постепенно выходит к верхней границе скважины.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа рассчитанных траекторий разрывов и влияния на них параметров задачи проведены дополнительные численные исследования.

Рассмотрим две скважины с приложенным внутренним давлением P в поле напряжений S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} (рис. 6а). На рис. 6б–г приведены напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} вдоль отрезка AB , нормированные на $|S_{xx}|$ при $S_{yy} = 1.5S_{xx}$, $S_{zz} = S_{xx}$, $P = 5S_{xx}$ и расстоянии между центрами скважин $d = 0.5$ м. Считаем, что положительные напряжения соответствуют растяжению среды, отрицательные — сжатию. Чтобы трещина оставалась в плоскости скважин, необходимо выполнение условия: вдоль отрезка AB напряжение σ_{yy} должно быть выше, чем σ_{zz} , так как полагаем, что трещина распространяется перпендикулярно минимальному напряжению сжатия (рис. 6б). В данном случае это условие выполняется в окрестности точек A и B вне области, выделенной штриховыми линиями. Внутри области при росте трещины можно ожидать ее отклонение от плоскости скважин, так как $\sigma_{zz} > \sigma_{yy}$. Этим объясняется наличие прогиба у рассчитанных в численных экспериментах трещин ближе к плоскости симметрии $x = 5$ м, расположенной между скважинами.

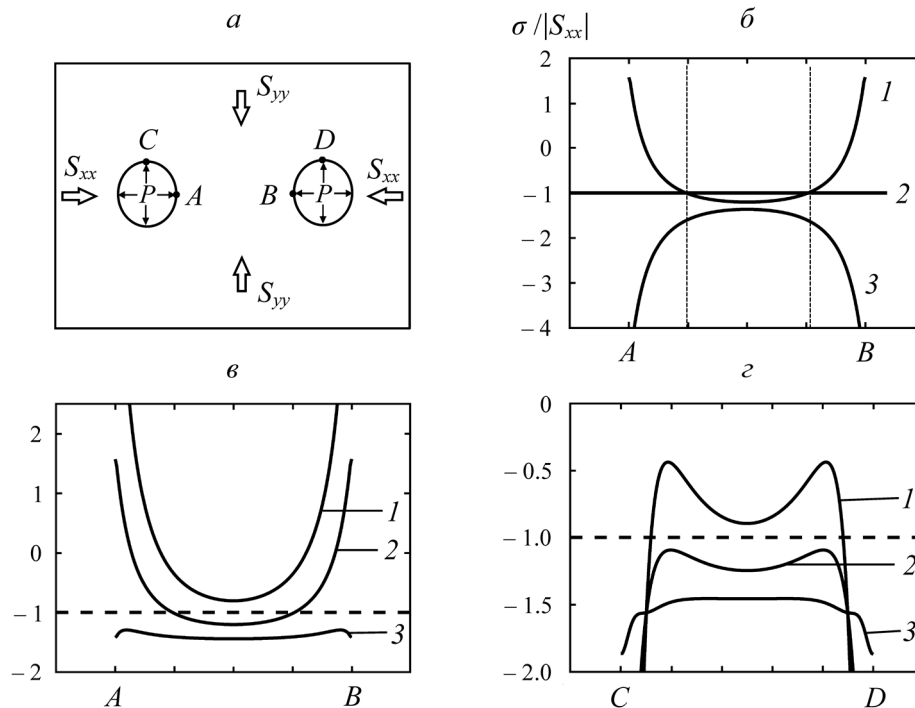


Рис. 6. Постановка задачи (а) и напряжения, нормированные на S_{xx} при различных условиях (б): 1 — σ_{yy} вдоль отрезка AB ; 2 — σ_{zz} вдоль скважин; 3 — σ_{xx} вдоль отрезка AB ; в — напряжение σ_{yy} вдоль отрезка AB при давлении $P = 10S_{xx}$ (1), $5S_{xx}$ (2) и $2S_{xx}$ (3) (штриховой линией отмечено значение σ_{zz}); г — то же, что и в, но вдоль отрезка CD

На рис. 6в показаны вертикальные напряжения σ_{yy} и напряжение σ_{zz} (штриховая линия) при разных давлениях в скважинах. Видно, что если давление в скважинах будет низким ($P = 2S_{xx}$), то кривая напряжений σ_{yy} полностью окажется ниже горизонтальных напряжений σ_{zz} , из-за чего можно ожидать переориентации трещины. При высоком давлении ($P = 10S_{xx}$) можно достичь условий, когда вертикальные напряжения σ_{yy} окажутся максимальными между скважинами, и тогда разрыв будет распространяться между ними. Следует учесть, что напряжение на контуре скважин в точках C и D может оказаться достаточно большим. Это приведет к формированию в точках трещин и их распространению в вертикальном направлении (в данном случае в точке C напряжение $\sigma_{xx} / |S_{xx}| = 7.7$, что значительно превосходит напряжения σ_{yy} между скважинами). Уход от линии, соединяющей две скважины, приводит к резкому ухудшению условий распространения трещины в плоскости скважин (см. рис. 6г).

В ходе численных экспериментов выявлено, что в условиях гидростатического и в некоторых случаях неоднородного поля напряжений в среде траектории трещин на поверхности скважин достаточно быстро ориентируются и распространяются вдоль их оси. Это можно наблюдать на следующем численном примере.

Рассмотрим модель с одной скважиной, на стенках которой существует начальная трещина квадратной формы размером 0.05×0.05 м с отклонением 5° и 10° по отношению к плоскости xz . Рост трещины обеспечивается постепенным увеличением давления на стенки скважины, при этом жидкость внутрь трещины не закачивалась (“сухой разрыв”). Давление в среде составляло $S_{xx} = S_{zz} = 1.0$ МПа, $S_{yy} = 2.0$ МПа. Трещины сразу ориентируются параллельно плоскости скважины и распространяются вдоль нее (рис. 7а). На рис. 7б показана локальная область вблизи вершины трещины на поверхности скважины. На данный элемент поверхности действуют напряжения σ_{11} и σ_{22} . В данном случае σ_{11} является горизонтальным напряжением сжатия σ_{zz} вдоль оси скважины, σ_{22} равно осесимметричным напряжениям. Вследствие приложенного давления на поверхности скважины выполняется условие $\sigma_{22} > \sigma_{11}$ (в неравенстве учитывается знак напряжений), приводя к росту трещины вдоль скважины, что и наблюдалось в расчетах.

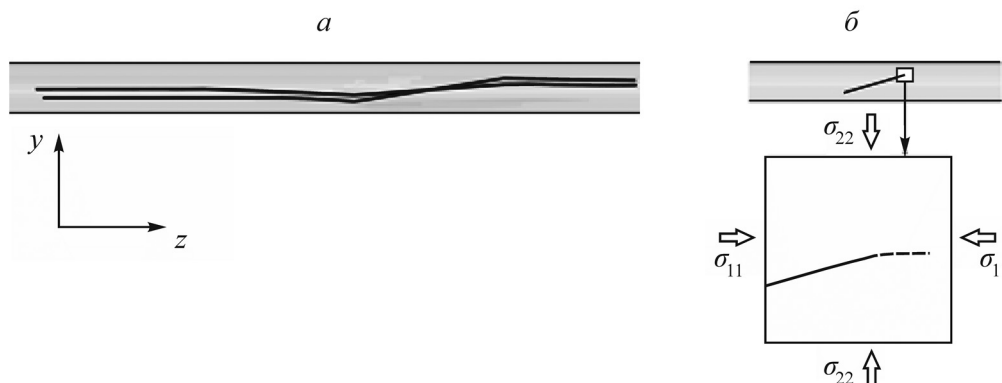


Рис. 7. Пересечение трещин со стенкой скважины при ее нагружении давлением в неоднородном поле напряжений $S_{xx} = S_{zz} = 1.0$ МПа, $S_{yy} = 2.0$ МПа для отклонений трещины 5° и 10° по отношению к плоскости xz (а) и локальная область вблизи вершины трещины на поверхности скважины с действующими напряжениями (б)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОРАЗРЫВА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Физическое моделирование гидроразрыва выполнялось на установке, позволяющей проводить исследования на крупноразмерных образцах кубической формы. Ее схема и основные характеристики приведены в [22, 23]. Были изготовлены два образца с длиной ребра 420 мм из пескобетона марки М300 (портландцемент и кварцевый песок в пропорции 1 : 2). После заливки в специальные формы, обеспечивающие параллельность граней, образцы выдерживались 21 день до полного отвердевания. Затем в них пробуривались по две скважины диаметром $D = 12$ мм с расстоянием между центрами 30 ($2.5D$) и 66 ($5.5D$) мм соответственно. Скважины не соединялись с начальной трещиной, как это выполнялось при численном моделировании. Для подачи рабочей жидкости в них устанавливались металлические штуцера длиной 85 мм, которые закреплялись эпоксидной смолой (рис. 8).

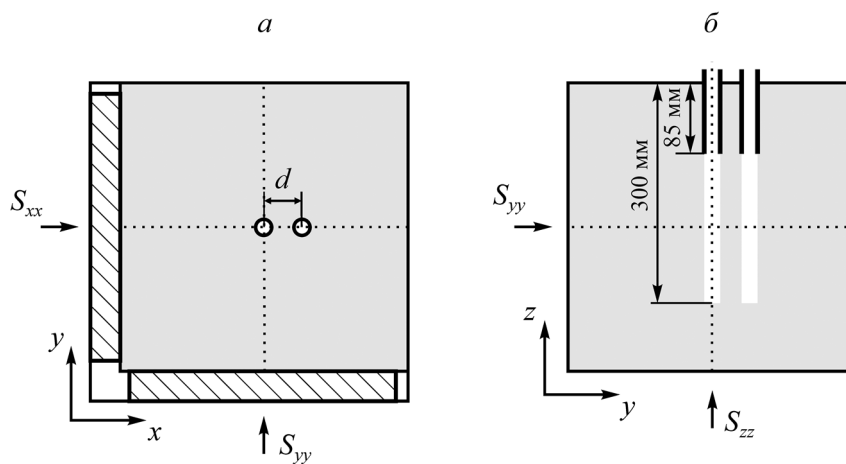


Рис. 8. Модель искусственного блока со скважинами в силовом контуре, оснащенном двумя плоскими домкратами: *а* — вид сверху; *б* — центральное сечение модели в плоскости zOy

Исследования материала изготовленных физических моделей и определение их механических свойств проводились на оборудовании ЦКП геомеханических, геофизических и геодинимических измерений СО РАН. Результаты приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Механические свойства геоматериала для двух физических моделей

Изготовленная модель	Предел прочности на сжатие, МПа	Модуль деформации, ГПа	Коэффициент сцепления, МПа	Угол внутреннего трения, град	Предел прочности на растяжение, МПа
Образец 1	19.78	5.39	3.53	50.70	2.52
Образец 2	21.05	3.50	3.55	52.77	2.39

Создание трещины в образце осуществлялось одновременной закачкой гидравлического масла МГЕ-46В в обе скважины. Длина необсаженного интервала скважины составляла 215 мм. В табл. 2 приведены условия нагружения физических моделей, зарегистрированные максимальные давления в первом и втором циклах гидроразрыва, а также объемы закачки на каждом цикле.

ТАБЛИЦА 2. Параметры эксперимента и давления гидроразрыва

Эксперимент	Условия нагружения, МПа			Максимальное давление рабочей жидкости, МПа		Закачанный объем рабочей жидкости, мл	
	S_{xx}	S_{zz}	S_{yy}	Первый цикл	Второй цикл	Первый цикл	Второй цикл
1	3.0	4.5	4.5	16.4	13.6	7.0	7.3
2	4.5	4.0	4.0	15.9	13.1	13.0	4.0

После эксперимента образец частично распиливался циркулярной пилой на глубину 70 мм, затем металлическими клиньями выполнялся его раскол. Плоскость разлома находилась на расстоянии 250 мм от верхней границы блока. На рис. 9 представлены фотографии поверхностей разлома физических моделей со следами сформированных трещин, а также результаты ручного трассирования обнаруженных разрывов.

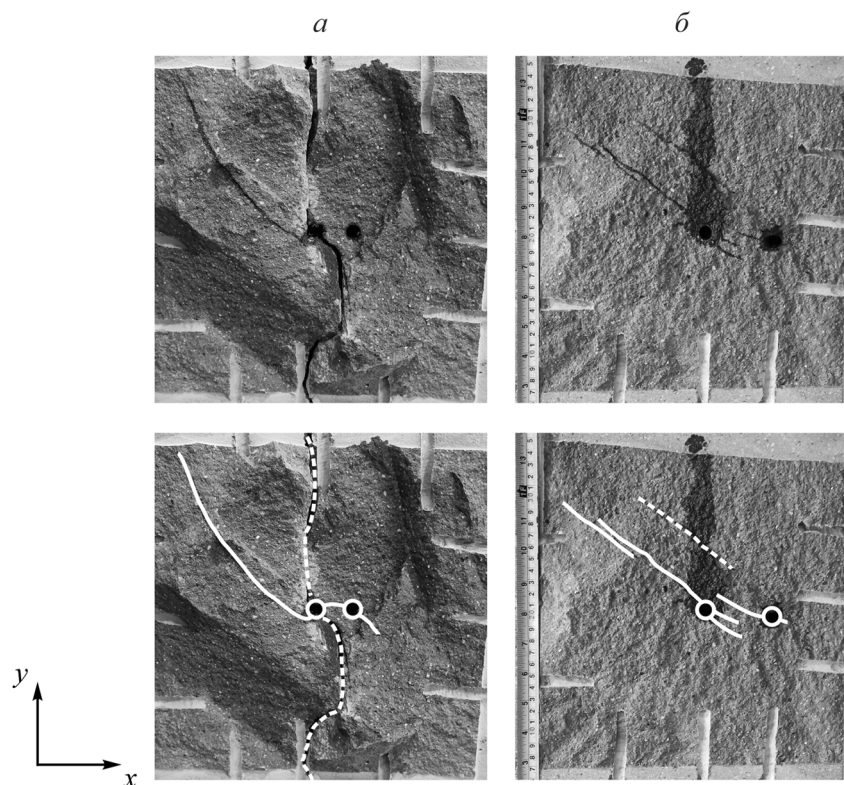


Рис. 9. Поверхности разлома физических моделей в плоскости yOx для расстояний между скважинами $d=2.5D$ (а) и $5.5D$ (б); сверху — исходные фотографии, снизу — с результатами ручного трассирования разрывов (сплошная линия) и искусственные трещины, образовавшиеся при разломе блока (штриховая)

При близком расположении скважин наблюдается их соединение трещиной гидроразрыва в условиях превышения напряжения S_{yy} над S_{xx} . Образование трещины преимущественно происходит в одной из скважин, что связано с низкой скоростью подачи рабочей жидкости и падением давления в гидравлической системе в начальный момент формирования разрыва. Во втором эксперименте соединение скважин посредством трещины не произошло, несмотря на максимальное напряжение S_{xx} . На верхней границе блока заметна трещина между скважинами, но она скорее

всего связана с наличием штуцеров, нижняя грань которых может играть роль инициаторов разрыва, вызывающих трещинообразование в приповерхностной области образца. Если анализировать расхождение трещин на плоскости разлома модели, то подобное поведение наблюдалось и в других численных и физических экспериментах [12, 16]. Сравнивая траектории разрывов в двух испытаниях, отметим, что в первом случае наиболее протяженное крыло трещины направлено к верхней границе блока, во втором — оно стремится выйти на боковую грань. Это объясняется значением горизонтальных напряжений сжатия S_{xx} по сравнению с остальными, которое минимально в первом испытании и максимально во втором.

ВЫВОДЫ

Установлены характерные особенности развития начальной трещины, созданной между двумя параллельными скважинами в неоднородном поле напряжений. Оценено влияние таких параметров, как угол отклонения начальной трещины от оси скважин, расстояние между скважинами, сжимающих напряжений на траекторию разрыва.

В гидростатическом поле напряжений трещина распространяется вдоль скважин. С ростом угла отклонения α увеличивается прогиб трещины между скважинами. При малых углах α трещина быстрее ориентируется параллельно плоскости скважин и далее распространяется в этом направлении. В случае, когда вертикальное сжатие превышает горизонтальные, даже при относительно небольшом угле отклонения 5° трещина переориентируется перпендикулярно плоскости скважин. Переориентация трещины происходит тем быстрее, чем сильнее сжимающие напряжения отличаются от прочности материала на растяжение σ_c .

Уменьшение расстояния между скважинами в гидростатическом поле напряжений приводит к меньшим отклонениям трещины от плоскости, соединяющей их центры даже при $\alpha = 10^\circ$. В неоднородном поле напряжений при минимальном расстоянии 0.25 м наблюдается постепенный выход трещины на верхнюю границу скважины.

Результаты физического моделирования гидроразрыва параллельных скважин показали, что их соединение трещиной происходит при относительно близком расстоянии между ними ($d = 2.5D$), а в случае $d = 5.5D$ такого соединения не происходит, несмотря на максимальное напряжение S_{xx} в эксперименте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rubtsova E. V. and Skulkin A. A. Hydraulic fracturing stress measurement in underground salt rock mines at Upper Kama Deposit, IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci., 2018, Vol. 134, 012049.
2. Yang D., Ning Z., Li Y., Lv Z., and Qiao Y. In situ stress measurement and analysis of the stress accumulation levels in coal mines in the northern Ordos Basin, China, Int. J. Coal Sci. Technol., 2021, Vol. 8. — P. 1336–1350.
3. Jeffrey R., Mills K., and Zhang X. Experience and results from using hydraulic fracturing in coal mining, Proc. 3rd Int. Workshop on Mine Hazards Prevention and Control, Brisbane, 2013. — P. 110–116.
4. Plaksin M. S. and Rodin R. I. Improvement of degasification efficiency by pulsed injection of water in coal seam, IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci., 2019, Vol. 377, 012052.
5. Guanhua N., Hongchao X., Zhao L., Lingxun Z., and Yunyun N. A new technique for preventing and controlling coal and gas outburst hazard with pulse hydraulic fracturing: A case study in Yuwu coal mine, China, Nat. Hazards, 2015, Vol. 75, No. 3. — P. 2931–2946.

6. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Проблемы управления труднообрушающимися кровлями при отработке пологих угольных пластов // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2019. — Т. 2. — № 4. — С. 162–169.
7. 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.
8. Shilova T., Patutin A., and Serdyukov S. Sealing quality increasing of coal seam gas drainage wells by barrier screening method, Int. Multidisciplinary Sci. GeoConference SGEM, 2013, Vol. 1. — P. 701–708.
9. Liu J., Liu C., and Yao Q. Mechanisms of crack initiation and propagation in dense linear multihole directional hydraulic fracturing. Shock Vib., 2019, Vol. 2019, 7953813.
10. Lu W., Wang Y., and Zhang X. Numerical simulation on the basic rules of multihole linear codirectional hydraulic fracturing. Geofluids, 2020, 6497368.
11. Lu W. and He C. Numerical simulation on the effect of pore pressure gradient on the rules of hydraulic fracture propagation, Energy Explor. Exploit., 2021, Vol. 39, No. 6. — P. 1878–1893.
12. 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, 8814352.
13. Bai Q., Liu Z., Zhang C. and Wang F. Geometry nature of hydraulic fracture propagation from oriented perforations and implications for directional hydraulic fracturing, Comput. Geotech., 2020, Vol. 125, 103682.
14. Bai Q., Konietzky H., Zhang C., and Xia B. Directional hydraulic fracturing (DHF) using oriented perforations: The role of micro-crack heterogeneity, Comput. Geotech., 2021, Vol. 140, 104471.
15. Cheng Y., Lu Y., Ge Z., Cheng L., Zheng J., and Zhang W. Experimental study on crack propagation control and mechanism analysis of directional hydraulic fracturing, Fuel, 2018, Vol. 218. — P. 316–324.
16. 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.
17. Patutin A. V., Martynyuk P. A., and Serdyukov S. V. Numerical studies of coal bed fracturing for effective methane drainage, J. Siberian Federal University, Eng. and Technol., 2013, Vol. 6, No. 1. — P. 75–82.
18. 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.
19. Song J. H., Areias P. M. A., and Belytschko T. A method for dynamic crack and shear band propagation with phantom nodes, Int. J. Numer. Meth. Eng., 2006, Vol. 67, No. 6. — P. 868–893.
20. Азаров А. В., Курленя 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.
21. Salimzadeh S. and Khalili N. A three-phase XFEM model for hydraulic fracturing with cohesive crack propagation, Comput. Geotech., 2015, Vol. 69. — P. 82–92.
22. 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.
23. Патутин А. В., Рыбалкин Л. А., Дробчик А. Н. Разработка устройства для гидроразрыва крупно-размерных образцов в лабораторных условиях // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2021. — Т. 8. — № 1. — С. 309–314.

Поступила в редакцию 04/II 2022

После доработки 24/II 2022

Принята к публикации 20/III 2022