

УДК 622.232

**СОЗДАНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТРЕЩИН ФЛЮИДОРАЗРЫВОМ
ПОРОДНОГО МАССИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКВАЖИН
В КАЧЕСТВЕ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЕГО ФРОНТА**

Н. Г. Кю

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: Ku.nik1945@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассматривается метод создания в твердой среде ориентированных сопряженных трещин, основанный на сочетании особенностей взаимодействия трещин со скважинами, флюидоразрыва пластичными материалами и использовании скважин в качестве направляющих фронтов и ограничителей границ разрывов. Обсуждается возможность его использования для повышения эффективности ведения открытых и подземных горных работ, а также для формирования в породном массиве замкнутых непроницаемых оболочек, способствующих созданию скважинно-щелевых технологий добычи полезных ископаемых без строительства шахт и рудников.

Трещина, флюидоразрыв, форма, скважина, направляющая, фронт флюидоразрыва

DOI: 10.15372/FTPRPI20200513

В ИГД СО РАН развивается направление по созданию нетрадиционных скважинно-щелевых технологий добычи полезных ископаемых, основанных на флюидоразрыве горных пород пластичными веществами [1–3]. Их преимущество состоит в управляемости процессом разрыва породных массивов с минимальной затратой удельной энергии на разрушение, обусловленной дезинтеграцией горных пород растягивающими усилиями. Рассматриваются возможности применения флюидоразрывов для создания в породном массиве сопряженных трещин, используемых в решениях многих задач горного производства.

Согласно теории хрупкого разрушения, разрыв горной породы происходит в месте максимальной концентрации напряжений, когда они достигают предела прочности горной породы на растяжение. Количественно это оценивается коэффициентом концентрации напряжений K . При формировании трещины значение K определяется длиной трещины $2r$ и ее радиусом кривизны у вершины. Для эллиптического отверстия $K = 1 + 2\sqrt{r/\theta}$ (r — радиус трещины, θ — радиус кривизны вершины трещины) [4].

Из формулы следует, что коэффициент концентрации напряжений снижается с ростом радиуса кривизны. Эта особенность используется на практике для прекращения роста трещины в плоских изделиях образованием перед вершиной трещины круглого отверстия [5]. В отличие от отверстия в плоском изделии (пластине), в настоящей работе отверстие (скважину) используют не для прекращения роста трещины, а для продолжения ее развития в заданном направлении. Выход трещины на поверхность длинного отверстия (шпура, скважины) означает ее выход на свободную по-

верхность. В традиционных способах разрыва горной породы (например, жидкостью) выход трещины на свободную поверхность приводит к падению давления в гидравлической системе (разгерметизации) и прекращению дальнейшего разрыва.

Внедрение пластичного вещества в горную породу происходит подобно клину. В отличие от жидкости, пластичное вещество раздвигает поверхность трещины без полного ее заполнения (фронт пластичного вещества отстает от фронта трещины). Между границами трещины и пластичного вещества образуется свободная кольцевая зона, из-за чего трещина после выхода на свободную поверхность продолжает развиваться. Вместе с этим клин из пластичного вещества адаптируется под параметры формируемой трещины. Способность пластичного вещества изменять свою форму приводит к тому, что поверхность клина приобретает форму поверхности формируемой трещины. Поэтому на контакте пластичного вещества с горной породой очагов концентрации напряжений, в которых могли бы зарождаться микротрещины с произвольной ориентацией, не возникает. Кроме того, фронт пластичного вещества следует за фронтом формируемой трещины, благодаря чему снижается искривление поверхностей разрыва. В результате трещина развивается с малой энергоемкостью, так как не расходуется энергия на образование побочных микротрещин, симметрично месту нагнетания пластичного вещества, а ее поверхности оказываются ровными. Характер разрыва горной породы существенно зависит от режима воздействия на нее пластичным веществом. При ударной нагрузке пластичное вещество воздействует на горную породу только в месте его контакта с нагружающим элементом и проявляет свойство твердого тела, концентрирующего напряжения в малой зоне, отчего даже при сравнительно небольшой энергии удара возникает начальная трещина. При статическом нагнетании и малом расходе пластичное вещество, подобно жидкости, проявляет эффект гидравлического усиления, за счет которого можно отрывать от массива блоки практически любых размеров.

ПРИНЦИП ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКВАЖИН В КАЧЕСТВЕ НАПРАВЛЯЮЩИХ ФРОНТОВ И ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ГРАНИЦ ФЛЮИДОРАЗРЫВОВ

На сочетании особенностей взаимодействия трещин со скважинами и флюидоразрыва твердой среды пластичными флюидами основан принцип использования скважин в качестве направляющих фронтов и ограничителей границ разрывов горных пород. Схема одного из возможных вариантов реализации указанного принципа представлена на рис. 1. В горной породе в плоскости предполагаемого разрыва бурят два шпура до пересечения их осей. В каждом из них размещают заполненную пластичным веществом трубку с прорезью. Прорези направляют в сторону разрыва. Из одной трубки пластичное вещество вытесняют стержнем путем ударных нагрузок, а из другой — винтом. При ударном воздействии на пластичное вещество через стержень образуется начальная трещина, которую затем развивают подачей в нее пластичного вещества вкручиванием винта в другую трубку.

Реализуемое на рис. 1 техническое решение ограничивает зону образования формируемой трещины и существенно снижает влияние естественных трещин на ориентацию разрыва. Обусловлено это тем, что бурение шпуров до пересечения их осей исключает, с одной стороны, проникновение пластичного вещества за пределы ограниченной шпурами зоны и, следовательно, там не создаются условия для возникновения начальной трещины, а с другой — устраняет возможность выхода фронта формируемой трещины из указанной зоны. При этом пластичное вещество, обладая свойством герметика, не проникает в естественные трещины через зазоры между трубками и стенками шпуров и не развивает их. В зоне сопряжения шпуров расстояние между прорезями двух трубок оказывается наименьшим, из-за чего в зоне концентрируются напряжения, образующие начальную трещину в плоскости расположения прорезей. Далее начальная трещина развивается под действием давления проникающего в нее пластичного вещества и рас-

пространяется вдоль шпуров до выхода на свободную поверхность. Направление прорези каждой трубки в сторону разрыва обеспечивает формирование трещины в зоне, ограниченной шпурами. В результате образуется трещина с заданными границами.

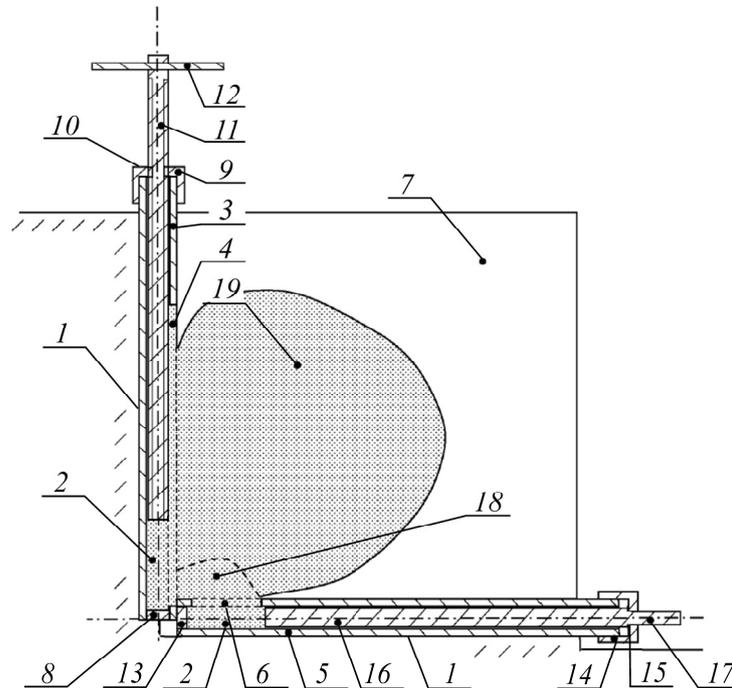


Рис. 1. Схема разрыва пород пластичным веществом: 1 — шпур; 2 — пластичное вещество; 3 — первая трубка; 4 — прорезь; 5 — вторая трубка; 6 — прорезь; 7 — предполагаемый разрыв; 8 — первая заглушка; 9 — первый стакан; 10 — центральное отверстие; 11 — винт; 12 — рукоятка; 13 — вторая заглушка; 14 — второй стакан; 15 — центральное отверстие; 16 — стержень; 17 — ступенчатое утончение; 18 — начальная трещина; 19 — зона пластичного вещества в трещине

Возможность реализации данного принципа доказана многочисленными экспериментами, результаты одного из них представлены на рис. 2. Предложенное техническое решение повышает эффективность добычи блочного камня за счет снижения потерь путем уменьшения зон техногенных нарушений породного массива за пределами участков его разработки и за счет снижения энергетических затрат на формирование трещин путем минимизации их размеров. При этом ориентация трещины обеспечивается тем, что она формируется через скважины, расположенные в одной плоскости.

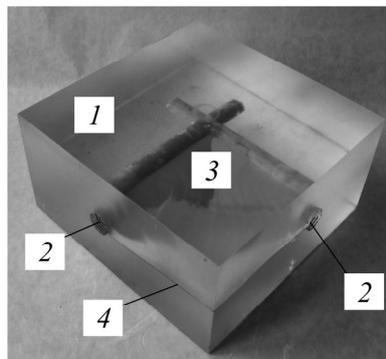


Рис. 2. Физическая модель в виде блока из органического стекла с созданной в нем прямоугольной трещиной, выходящей на свободную поверхность: 1 — блок; 2 — отверстие; 3 — пластилин; 4 — трещина

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕЩИНЫ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Использование указанного принципа позволяет придавать флюидоразрывам различные размеры и формы, а в сочетании с применением флюидов, обладающих широким спектром всевозможных свойств, формировать трещины различного назначения, например для излучения и приема упругой и электромагнитной энергии, гидроизоляции, повышения проницаемости породного массива и т. д. Очевидно, что трещина с поданным в нее флюидом в зависимости от ее назначения должна обладать соответствующими свойствами, определяемыми геометрическими и физическими величинами.

Рассмотрим свойства трещины, характеризующиеся геометрическими величинами, т. е. ориентацией, размерами и формой. На рис. 3 приведено техническое решение по снижению поступления в выработку воды с верхних горизонтов. Оно обеспечивает перепуск воды с верхних горизонтов на нижние, минуя выработку. Для этого над выработкой формируют две сопряженные через скважину трещины с показанным на рис. 2 углом и заполняют их гидроизоляционным материалом. Длина каждой трещины в десятки раз превышает ее ширину. Трещины с подобным соотношением геометрических величин можно формировать с помощью параллельных скважин, что подтверждено экспериментально (рис. 4а). Отметим, что трещину, используя скважины в качестве направляющих ее фронта, можно развивать в пределах скважин практически неограниченно. Возможность использования скважин в качестве ограничителей зоны развития трещины показана в эксперименте на блоке из органического стекла, в котором сформирована трещина треугольной формы (рис. 4б).

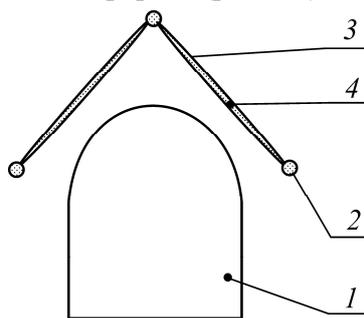


Рис. 3. Схема снижения поступления в выработку воды с верхних горизонтов: 1 — выработка; 2 — скважина; 3 — трещина; 4 — гидроизоляционный материал

Представленные схемы проведения экспериментов составлялись и использовались с учетом минимизации влияния различных факторов на процесс взаимодействия формируемых трещин с отверстиями (скважинами). Преимущество применения для разрыва твердых тел пластичных веществ состоит в возможности проведения разрывов из любого места, включая свободную поверхность, совмещения различных операций, снижения влияния напряжений во вмещающей среде. Приведем пример формирования трещины со свободной поверхности (рис. 5), где пройденную скважину заполняют пластичным веществом, которое вытесняют штангой в формируемую трещину. Здесь в качестве устройства для нагнетания пластичного вещества используется сочетание отверстия (скважины) и штанги, герметизация осуществляется штангой, ориентация трещины задается клином на конце штанги, место нагнетания пластичного вещества совпадает с концом штанги и перемещается синхронно со штангой. Фронт трещины перемещается вдоль скважины, так как пластичное вещество поступает из нее, и ориентирован согласно положению клина на конце штанги. В результате разрыв происходит без предварительного создания инициирующей щели, герметизации скважины и исполь-

зования отдельных нагнетательных механизмов, а трещина “привязана” к скважине, из-за чего существенно снижается влияние различных факторов на ориентацию ее возникновения, траекторию и начальную стадию развития.

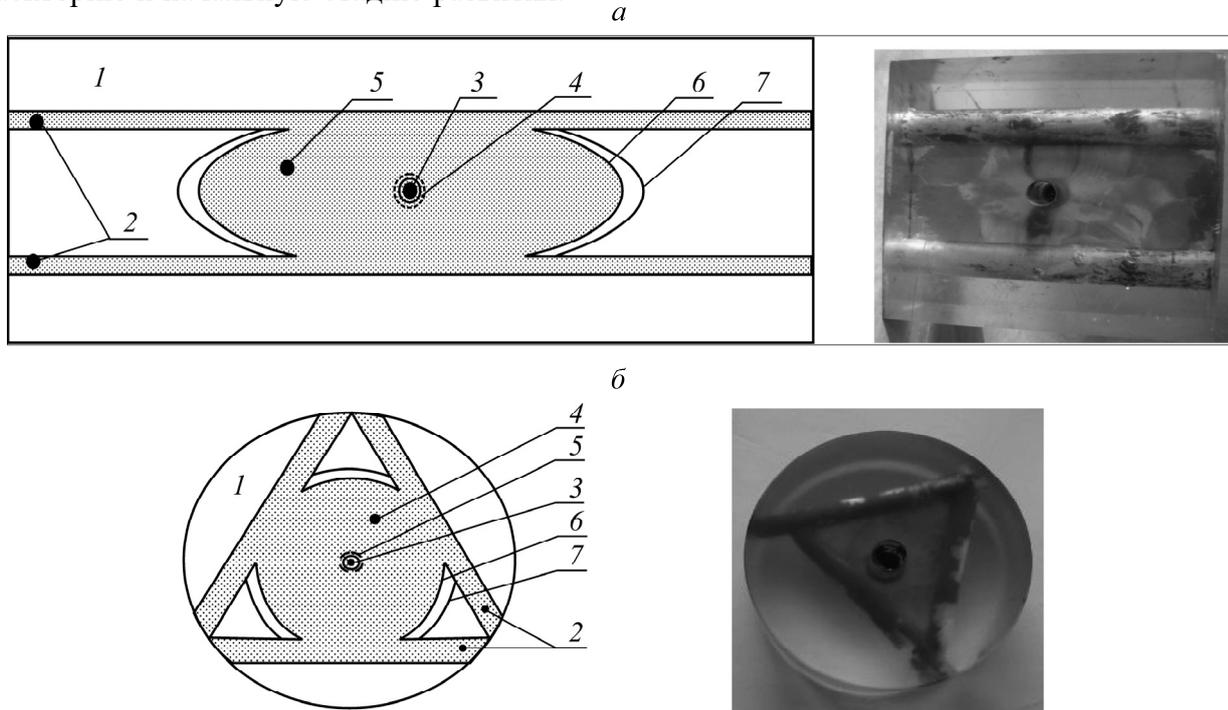


Рис. 4. Схема и фотография прямоугольной трещины, сформированной между двумя отверстиями (а), то же между тремя отверстиями (б): 1 — блок из органического стекла; 2 — отверстия; 3 — отверстие, через которое нагнетают пластичное вещество; 4 — иницирующая щель; 5 — пластичное вещество; 6 — граница пластичного вещества; 7 — фронт трещины

При решении многих задач горного производства и снижения объема необходимых работ, обусловленных проходкой большого числа скважин, целесообразно из одной скважины формировать несколько трещин с различными ориентациями. Особенность разрыва породного массива из одного места по нескольким различным направлениям состоит во взаимном влиянии формируемых трещин.

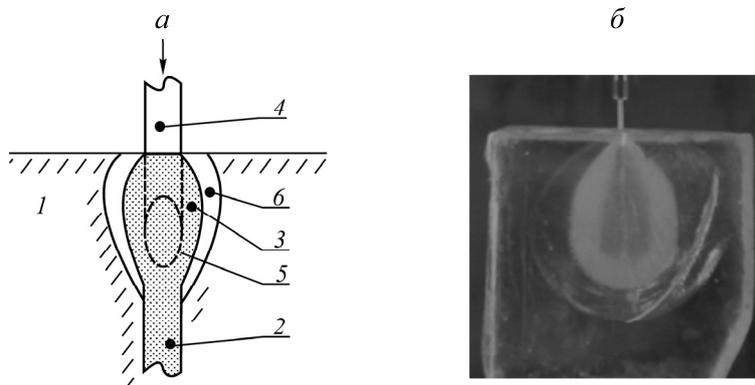


Рис. 5. Схема (а) и фотография (б) формирования трещины вытеснением в нее пластичного вещества из скважины штангой: 1 — породный массив; 2 — скважина; 3 — пластичное вещество; 4 — штанга; 5 — клин; 6 — трещина

Характер взаимодействия полей от различных трещин определяется углами между плоскостями, в которых они формируются. Существуют три разновидности характера взаимного влияния трещин: 1) при угле между указанными плоскостями меньше 90° трещины препятствуют одновременному совместному развитию. Проявляется это как искривление поверхностей и неуправляемость процессом их формирования; 2) при угле между плоскостями 90° взаимное влияние трещин практически отсутствует; 3) при угле больше 90° трещины способствуют росту друг друга, благодаря чему под давлением флюида, подаваемого в гидравлически связанные между собой трещины, наблюдается их устойчивое одновременное развитие. Отметим, что в 1-й и 2-й разновидностях характера взаимного влияния трещин в случае наличия между ними гидравлической связи развивается только одна трещина, имеющая наибольший размер. Такая трещина развивается при меньшем давлении, которого недостаточно для роста других трещин. В разновидности 3 трещины возникают не только под давлением нагнетаемого в них флюида, но и создаваемого ими поля напряжений, которое проявляется в виде усилий, растягивающих поверхности каждой трещины [6].

Показано, что из одного места можно одновременно формировать не более трех устойчиво развивающихся трещин в полуплоскостях, исходящих из оси скважины. Наиболее устойчиво такие трещины развиваются тогда, когда углы между ними составляют 120° . При этом взаимное влияние между трещинами оказывается одинаковым и способствует развитию каждой из них. Результаты одного из многочисленных экспериментов представлены на рис. 6.

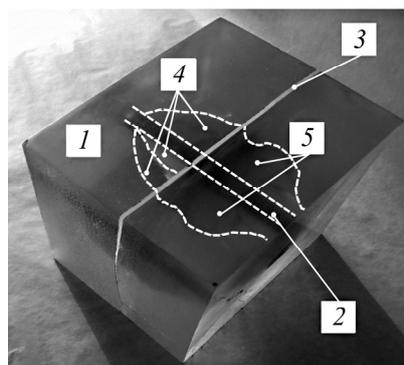


Рис. 6. Формирование из одного отверстия нескольких трещин: 1 — блок из органического стекла; 2 — отверстие; 3 — трещина поперек отверстия 2; 4 — три трещины под углом 120° друг относительно друга; 5 — две трещины в одной плоскости

В блоке из органического стекла через просверленное в нем отверстие вначале сформировали поперечную трещину 3 (рис. 6). Затем с одной стороны трещины 3 сформировали три трещины 4 под углом 120° друг к другу, а с другой стороны трещины 3 сформировали две трещины 5 в одной плоскости (под углом 180°).

СОЗДАНИЕ ЗАМКНУТЫХ НЕПРОНИЦАЕМЫХ ОБОЛОЧЕК В ПОРОДНОМ МАССИВЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЕЩИН, СОПРЯЖЕННЫХ ПО СКВАЖИНАМ

Переход подземных горных работ на большие глубины связан с постоянно возрастающими трудностями строительства и эксплуатации шахт и рудников, обеспечения в них безопасных условий труда. Технологии извлечения полезных ископаемых без присутствия под землей горняков приобретают все большее значение. Рассмотрим возможности использования флюидоразрывов для создания в породном массиве замкнутых непроницаемых оболочек, необходимых при удержании растворов в заданных областях, что требуется в технологиях выщелачивания

меди или урана. Особенность создания таких оболочек состоит в том, что вначале скважины используют как направляющие и ограничители фронтов флюидоразрывов, а затем в качестве конструктивных элементов, соединяющих две или более трещины, заполненные веществами с заданными свойствами. Предварительно определяют напряженное состояние, структуру породного массива и составляют регламент работ. Если в породном массиве оказывается горизонтальная плоскость ослабления (для слоистых массивов), то ее используют для создания первоначальной трещины, поверхность которой распирают, формируя щель, которая ограничивает рост вертикальных трещин и образует дно создаваемой оболочки.

Вариант создания оболочки в виде стакана (непроницаемой емкости), существенно снижающей потери растворов при выщелачивании меди или урана, показан на рис. 7. Проходят вертикальную (центральную) скважину 1, в плоскости забоя которой формируют горизонтальную трещину 2. Затем в зоне нахождения трещины 2 проходят вертикальные скважины 3. Между вертикальными скважинами 3 формируют трещины 4 до их сопряжения с горизонтальной трещиной 2. Все трещины и вертикальные скважины 3 заполняют твердеющим раствором, который после отверждения преобразуется в эластичную непроницаемую пленку. В породном массиве образуется емкость, исключая возможность вытекания из нее подаваемых растворов. Отметим, что через скважину 1 внутри указанной емкости можно провести пошаговые гидравлические разрывы, дезинтегрирующие горную породу, которые повышают эффективность извлечения полезного ископаемого за счет увеличения площади его контакта с растворителями.

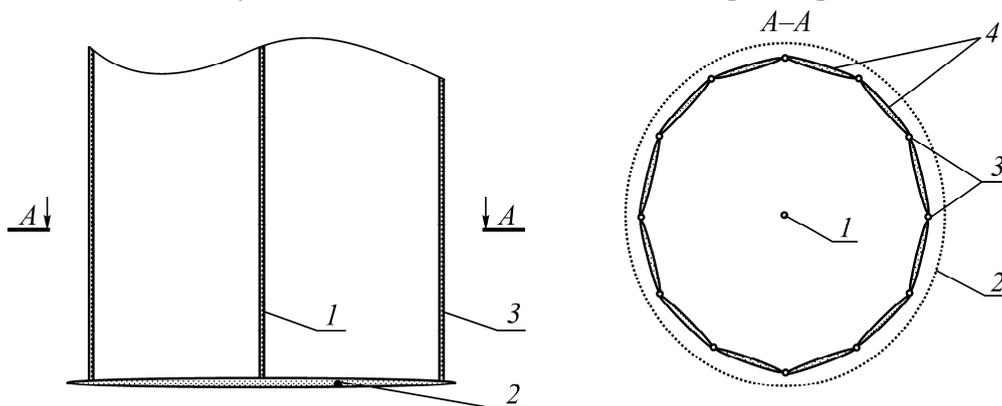


Рис. 7. Схема создания оболочки в виде стакана: 1 — центральная скважина; 2 — горизонтальная трещина; 3 — скважины; 4 — вертикальные трещины

На основе принципов построения указанных оболочек, образованных совокупностью сопряженных трещин, предполагается создавать нетрадиционные скважинно-щелевые технологии подземной добычи полезных ископаемых. Их целесообразность обусловлена возможностью их применения для условий больших глубин, на которых ведение работ традиционными методами с применением шахт и рудников в настоящее время не представляется возможным.

ПРОВЕДЕНИЕ ФЛЮИДОРАЗРЫВА С УЧЕТОМ НАПРЯЖЕНИЙ ВО ВМЕЩАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Суть ориентированного флюидоразрыва состоит в создании в заданной плоскости поля растягивающих напряжений, доведения их значений до предела прочности вмещающей среды на растяжение и последующего нагнетания в образовавшуюся трещину (в результате разрыва среды) флюида с требуемым расходом. Возникает суммарное поле напряжений, которое определяет ориентацию и характер дальнейшего развития указанной трещины. Для определения суммарного поля требуется информация об исходном поле напряжений в среде (далее естест-

венное поле напряжений) и поле напряжений, обусловленном операциями по проведению ориентированного флюидоразрыва (искусственное поле напряжений).

К прямым методам оценки напряжений в породном массиве можно отнести измерительный гидравлический разрыв и разрыв горной породы пластичным веществом. Трудности реализации измерительного гидравлического разрыва заключаются в необходимости формирования симметричной относительно скважины сплошной трещины с размерами, не влияющими на давление ее раскрытия, а также точного определения давления, соответствующего различным этапам проведения измерений. Для оценки состояния массива по его реакции на разрыв пластичным веществом требуется знание параметров разрыва горной породы в ненагруженном состоянии.

Трещина, сформированная флюидоразрывом среды и заполненная флюидом под давлением создает поле напряжений, определяемое распределением давления во флюиде. Параметры такого искусственного поля напряжений существенно зависят от размеров и формы зоны, занятой флюидом в трещине. Сложность теоретического описания поля напряжений от трещины, заполненной пластичным веществом под давлением, обусловлена особенностями свойств различных пластичных веществ. С увеличением скорости частиц снижается вязкость пластичного вещества, а с падением вязкости пластичного вещества возрастает скорость его частиц. В результате частицы пластичного вещества движутся с лавинообразно меняющимися скоростями, обгоняя друг друга. Этот эффект можно наблюдать визуально при формировании трещины в блоке из органического стекла пластилином разного цвета. Пластилин подают в трещину порциями с различным цветом в каждой порции. От этого в трещине образуется система концентрических колец с явно выраженными разделяющими их границами. Указанный эффект проявляется в виде ломаной линии из отрезков, соотношение размеров которых меняется с их удалением от места нагнетания пластилина в трещину (рис. 8).

Средняя скорость частиц пластичного вещества в трещине зависит от их местоположения, расхода нагнетаемого пластичного вещества, формы и размеров трещины. Например, в круглой трещине частицы возле отверстия (скважины) движутся быстрее, чем на границе зоны ее заполнения. После проведения флюидоразрыва давление в трещине продолжает перераспределяться. Длительность процесса перераспределения давления в трещине после подачи в нее пластичного вещества может исчисляться часами, сутками и даже месяцами.

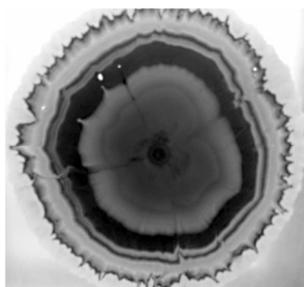


Рис. 8. Трещина, сформированная в блоке из органического стекла путем подачи в нее пластилина порциями с различным цветом в каждой порции

Трещина, формируемая пластичным веществом, создает локальное поле напряжений, значения которых в месте нагнетания пластичного вещества больше соответствующих значений напряжений естественного поля вмещающей среды и способствуют ее разрыву в плоскости, ортогональной поверхностям трещины. Отметим, что удержанию начальной ориентации трещины способствует тот факт, что пластичное вещество проявляет эффект механического клина, из-за чего направление усилий на поверхности формируемой трещины не зависит от процессов, про-

исходящих на фронте трещины. Используя сочетание искусственного поля напряжений от трещины и эффекта механического клина от применения для разрыва среды пластичного вещества, можно в указанной плоскости создавать трещины для решения различных задач горного дела.

На больших глубинах, где напряжения приближаются к пределам прочности горных пород, из-за техногенного воздействия породный массив оказывается в сложном напряженно-деформированном состоянии. Классический подход решения таких задач требует более точного обоснования размеров конструктивных элементов, в данном случае оценки расстояний между параллельными скважинами, где происходит их сбойка трещинами. Чтобы уменьшить расстояния между скважинами, потребуется бурение дополнительных скважин, что увеличит необходимый объем работы. Если учесть, что на больших глубинах при высоких напряжениях вокруг выработок в плоскостях их поперечных сечений могут образовываться кольцевые зоны с пониженным значением напряжений, то проведение флюидоразрыва можно значительно упростить. Если через одну из таких зон параллельно выработке пройти скважину и начать формировать из нее две трещины, то они будут развиваться по контуру выработки (рис. 9). Таким образом, за счет учета характера поля напряжений, образуемого проходкой выработки на большой глубине, можно уменьшить объем необходимых работ при решении задачи снижения поступления в выработку воды с верхних горизонтов.

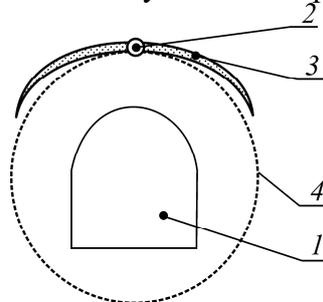


Рис. 9. Схема снижения поступления в выработку воды с верхних горизонтов для больших глубин: 1 — выработка; 2 — скважина; 3 — трещина с гидроизоляционным материалом; 4 — условная окружность внутри одной из зон дезинтеграции горных пород

Целесообразно формировать трещины в плоскостях, где действуют главные максимальные сжимающие напряжения, а минимальные сжимающие напряжения оказываются к ней нормальными. В этом случае упрощается проведение флюидоразрыва, так как он протекает при меньших давлениях. Пример технической реализации такого решения представлен на рис. 10.

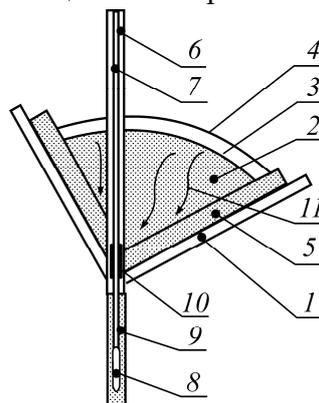


Рис. 10. Схема подготовки породного массива к выщелачиванию: 1 — скважина для проведения флюидоразрыва; 2 — трещина с пластичным веществом; 3 — граница пластичного вещества; 4 — граница (фронт) трещины; 5 — трещина, ортогональная трещине 2; 6 — скважина; 7 — труба; 8 — погружной насос; 9 — раствор; 10 — место стекания в скважину раствора; 11 — линии перемещения раствора по поверхности трещины 2

В плоскости, где действуют максимальные главные напряжения, проходят две наклонные скважины, пересекающиеся в глубине породного массива (рис. 10). Между наклонными скважинами формируют трещину 2 разрывом горной породы пластичным гидроизоляционным веществом, которое не растворяется в используемых для выщелачивания растворителях, например пластилином, битумом, воском. Затем из этих же скважин формируют еще по одной трещине, которые образуют борта, исключая возможность вытекания растворов за пределы зоны выщелачивания. Через место пересечения наклонных скважин проходят вертикальную скважину и организуют между нею и верхней поверхностью трещины 2 гидравлическую связь. На поверхность скважины наносят гидроизоляционный слой, после чего опускают в нее трубу с глубинным насосом на конце. Раствор, образующийся от растворения горной породы, стекает по поверхности трещины 2 в вертикальную скважину, откуда его выкачивают через трубу глубинным насосом. В результате упрощается проведение флюидоразрыва за счет исключения операций по заданию и поддержанию ориентации плоскости разрыва.

Представленные результаты исследований и технические решения направлены на повышение эффективности отбойки горной породы от породного массива и создание нетрадиционных скважинно-щелевых технологий подземной добычи полезных ископаемых без строительства шахт и рудников.

ВЫВОДЫ

Ориентация трещины и место ее возникновения задаются пробуренными в одной плоскости пересекающимися скважинами. Скважины, используемые в качестве направляющих фронта флюидоразрыва, ограничивают зону разрыва горной породы и снижают влияние напряженного состояния и структуры породного массива на ориентацию формируемой трещины. Разрыв породного массива пластичным веществом, вытесняемым из скважины штангой, позволяет синхронно формировать до трех трещин в плоскостях, проходящих через ось скважины. Сочетание известных принципов разрушения хрупких тел и установленных закономерностей взаимодействия хрупкой среды с внедряющимся в нее пластичным веществом обеспечивает возможность создания системы сопряженных между собой трещин, способной образовывать замкнутые оболочки. Учет и использование напряжений во вмещающей среде способствуют повышению эффективности флюидоразрывов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамбовцев П. Н. Экспериментальные исследования процесса флюидоразрыва породных блоков ударным способом // ФТПРПИ. — 2004. — № 3. — С. 52–59.
2. Алексеенко О. П. К расчету характеристик флюидоразрыва труднообрушаемой кровли пластичным флюидом // Взаимодействие механизированных крепей с боковыми породами. — Новосибирск: ИГД СО РАН СССР, 1987.
3. Кю Н. Г. Особенности разрушения горных пород при флюидоразрыве пластичным веществом // ФТПРПИ. — 2011. — № 4. — С. 39–50.
4. Займовский В. А. Трещина — враг металла // Квант. — 1984. — № 2. — С. 6–12.
5. Пат. 1343689 РФ, В23Р 6/00. Способ задержки роста усталостных трещин в конструкциях / Шанявский А. А.; заявитель и патентообладатель Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации. — № 396260027; заявл. 10.10.1985, опубл. 15.04.1994.
6. Кю Н. Г. Особенности и проблемы флюидоразрывов породных массивов // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 44–56.

Поступила в редакцию 24/XII 2019

После доработки 12/V 2020

Принята к публикации 11/IX 2020