

УДК 622.232

## ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ ФЛЮИДОРАЗРЫВОВ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ

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*

Эффективность реализации преимуществ флюидоразрыва при решении конкретных задач горного производства существенно зависит от достоверности оценки структуры и состояния породного массива, определения места начала разрыва, выбора флюида, режима его нагнетания, применяемых технических решений. Флюидоразрывы проявляются как процессы, изменяющие свойства, структуру, состав и состояние породных массивов. Их изучение углубляет познание естественных многофазных сред (земной коры) и способствует развитию нетрадиционных технологий добычи полезных ископаемых.

*Флюидоразрыв, концентраторы напряжений, хрупкое разрушение, герметизация скважин, нагнетание флюида, поперечный и продольный разрывы, пластичные вещества, управление флюидоразрывом*

DOI: 10.15372/FTPRPI20170506

Под флюидоразрывом подразумевается разрыв среды давлением внедряющегося в нее флюида. Флюид — вещество, способное изменять свою форму без внутренней дезинтеграции (образования трещин, пустот). Он может быть твердым (воск, пластилин, свинец), жидким, газообразным и многофазным (смесь твердого вещества, жидкости и газа). В общем, флюидоразрыв является многопараметрическим процессом взаимодействия среды и флюида с нелинейными, как правило, не установленными зависимостями между параметрами.

Разрыв горной породы флюидами с различной реологией — широко распространенное в природе явление. Он происходит как на больших глубинах, так и на земной поверхности. В результате флюидоразрыва образуется заполненная соответствующим флюидом трещина (щель). Она может иметь простую и весьма сложную форму, а размеры — от долей миллиметра до десятков и даже сотен километров.

Флюидоразрыв происходит в местах концентрации напряжений. Начинается он с появления исходной трещины, куда устремляется флюид и давит на поверхности ее берегов. При этом возникают растягивающие усилия и трещина продолжает развиваться до тех пор, пока давление находящегося в ней флюида не снизится до критического значения, определяемого свойствами горных пород, условиями их залегания, горным давлением и размерами самой трещины. В однородной монолитной среде с начальным равнокомпонентным напряженным состоянием флюидоразрыв протекает в плоскости предварительно созданной исходной трещины.

Флюидоразрывы сопровождаются различными физическими и химическими процессами, которые протекают в широком диапазоне изменения температуры, давления, свойств флюидов и горных пород. При этом излучается упругая и электромагнитная энергия; рвутся межатомные и межмолекулярные связи; флюиды вступают в химическую реакцию с вновь образованной поверхностью горных пород; меняется окружающая среда; в результате химических реакций выделяются либо поглощаются газы, появляются новые вещества с соответствующим спектром всевозможных свойств; перераспределяются напряжения в породном массиве.

Флюидоразрывы наряду с другими естественными явлениями существенно влияют на формирование породных массивов. Они обуславливают образование прослоек, жил, даек, в которых могут содержаться кристаллы, руды, иное ценное сырье. Не исключено, что горные хребты — следствие прорыва через земную кору магмы в результате флюидоразрывов. В настоящее время на дне океанов имеются протяженные трещины (щели), через которые извергается текущая лава (флюид) с образованием возвышенностей. Иногда флюидоразрывы вызывают такие динамические явления, как извержение вулканов, горные удары.

Возможности флюидоразрывов для решения конкретных задач, их значение в формировании породных массивов и практической деятельности нельзя считать достаточно изученными. Познание флюидоразрывов происходило в основном исследованием их проявлений в виде механических динамических процессов. Так, в начале 20 в. участились случаи внезапного разрушения мостов, судов, самолетов, других изделий из металла. Они исчислялись тысячами и сопровождались гибелью людей. Первым, кто понял и объяснил причину этих катастроф, был английский ученый А. Гриффитс [1]. В 20-е годы прошлого столетия ему удалось завершить серию экспериментов по разрушению гидравлическим давлением стеклянных цилиндров и сферических колб. Фактически это первые сознательно проведенные гидроразрывы (флюидоразрывы) хрупкого материала. Причиной внезапного разрушения изделий из металла оказалась растущая трещина. Именно такая трещина является основной составной частью флюидоразрыва. Раскрытие природных трещин в массиве путем нагнетания в них жидкости впервые осуществлено в 40-х гг. в США [2]. Выполнялось оно с целью увеличения проницаемости нефтяных коллекторов и тем самым повышения дебита нефтяных скважин.

Начало теоретического изучения процесса развития трещины (щели) под действием давления жидкости на внутренние ее поверхности относится к работе [3]. В 60–70-е гг. область исследований силового воздействия жидкостей на породный массив существенно расширилась. Уточнялись представления и терминология. Чтобы отличать раскрытие трещин от их возникновения, в [4] введено понятие “гидравлическое расчленение”. Тем не менее в большинстве работ того времени различные по физической сущности процессы, протекающие в породном массиве в результате нагнетания в него жидкости под высоким давлением и с большим расходом, отождествлялись между собой и объединялись одним термином — гидроразрыв.

В работе [5] для решения многих практических задач выдвинута идея создания в породном массиве одиночной щели с заданной ориентацией и заполненной веществом, обладающим требуемыми свойствами. Одновременно разработан способ формирования такой щели посредством разрыва породного массива соответствующим флюидом. В качестве флюида кроме воды предложено использовать и другие более или менее подвижные вещества, которые могут быть в газообразном, жидком или твердом агрегатном состоянии (твердые золи, суспензии, аэрозоли, твердые эмульсии — пасты, пластилин, гели, пены). Чтобы отметить возможность разрыва породных массивов веществами, находящимися в различном агрегатном состоянии, введен обобщающий термин — флюидоразрыв, а метод формирования одиночной щели с заданной ориентацией назван методом ориентированного флюидоразрыва (ОФР).

С помощью ОФР можно управлять свойствами и состоянием породных массивов; осуществлять дегазацию угольных пластов; без применения взрывов добывать ценное кристаллическое сырье, прочный строительный камень, разбирать старое сооружение или завалы; прокладывать туннели и дороги в гористой местности и т. д.

#### **ПРИНЦИПЫ ПРОВЕДЕНИЯ ФЛЮИДОРАЗРЫВОВ И ПРОБЛЕМЫ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ**

Проведение флюидоразрывов заключается в выполнении операций по созданию условий, при которых происходит разрыв хрупкой среды нагнетаемым в нее флюидом. Выбор совокупности операций и последовательность их выполнения определяются требованиями к конечному

техническому результату. Наиболее простые требования к флюидоразрыву предъявляются при решении задач по разборке монолитных объектов на куски произвольных размеров и формы, обеспечивающих лишь возможность их погрузки и транспортирования. Подобные задачи решают при отбойке руды, добыче ценного кристаллического сырья, проходке тоннелей и дорог в гористой местности, разборке старых сооружений. Более сложными являются задачи проведения флюидоразрывов, обеспечивающих отделение от породных массивов блоков заданных размеров и формы по установленным плоскостям. Такие флюидоразрывы повышают эффективность добычи строительного естественного камня.

Самым сложным и не всегда возможным считается проведение флюидоразрывов, от которых требуется создание сплошных трещин с заданной ориентацией в породном массиве с произвольной структурой и находящимся в сложном напряженно-деформированном состоянии. Такие задачи нужно решать для оценки напряжений, изменения свойств горных пород (например, проницаемости), создания элементов направленного излучения и приема упругой и электромагнитной энергии, разработки нетрадиционных технологий добычи полезных ископаемых скважинно-щелевыми способами (выщелачиванием, растворением, разжижением) без строительства шахт и рудников.

Для начала флюидоразрыва достаточно сформировать либо использовать полость (трещину). Далее в нее следует нагнетать флюид под давлением, поддерживающим процесс флюидоразрыва. Согласно теории хрупкого разрушения [1] и многочисленным экспериментам, с увеличением размеров флюидоразрыва давление флюида, необходимое для поддержания его развития, уменьшается. В большинстве случаев подачу флюида в формируемую трещину осуществляют через скважину (шпур, отверстие).

Для разборки монолитного объекта на куски с произвольными размерами и формой скважина может быть пройдена любым способом, так как трещины в ее стенках не влияют на конечный результат. При проведении флюидоразрыва в заданной плоскости, в пределах участка скважины, из которого нагнетают флюид, не должно быть трещин с произвольными ориентациями, способных задавать направление разрыва. Распространенное ударно-вращательное бурение, основанное на разрушении горной породы ударными нагрузками, образует переходящие от забоя в стенки скважины трещины, способные из-за высокой концентрации напряжений в их вершинах оказывать существенное влияние на ориентацию флюидоразрыва. Для проведения флюидоразрывов в требуемой плоскости скважины, пройденные ударно-вращательным бурением, не следует использовать. Флюидоразрывы с заданной ориентацией в скальных горных породах типа гранита и его аналогов предполагается осуществлять из скважин, пройденных алмазным бурением.

Известно, что трещина возникает в поле растягивающих напряжений и далее развивается в направлении максимальных сжимающих напряжений. Задание ориентации флюидоразрыва состоит в создании требуемого начального поля напряжений, для чего бурят или используют скважину, в которой создают иницирующую щель или трещину в плоскости. По обе стороны щели (трещины) скважину герметизируют и в герметизированный участок нагнетают флюид под давлением, при котором развивается разрыв. Благодаря давлению флюида в иницирующей щели, в плоскости ее расположения создается поле растягивающих напряжений, которое и определяет ориентацию разрыва. Однако начальное поле напряжений зависит не только от параметров иницирующей щели, но и от способа герметизации скважины. Для проведения ОФР поперек скважины не всегда можно использовать известные средства герметизации обсадной колонны скважины, например применяемые в технологиях гидравлического разрыва нефтяного пласта, где в основном требуется создавать искусственные каналы для повышения притока нефти к скважине, ориентация которых в пространстве не имеет решающего значения.

Традиционно скважины герметизируют устройствами (пакерами), содержащими эластичные элементы, которые прижимают к стенкам скважины. Для герметизации участка скважины с обеих сторон создан двойной пакер [6], содержащий два эластичных элемента, надетых на одну трубу, через которую подают флюид в зону разрыва. Такой способ герметизации скважины не гарантирует возникновение и развитие трещины флюидоразрыва в плоскости, перпендикулярной оси скважины. Согласно результатам многочисленных экспериментов на физических моделях, использование для герметизации зоны разрыва эластичными элементами, распираемыми в стенки скважины, приводит к отклонению ориентации трещины флюидоразрыва от заданной плоскости. Обусловлено это тем, что эластичные элементы, аналогично распорным устройствам для разрушения горных пород, создают поле напряжений, способствующее формированию трещин вдоль скважины, и поэтому влияют на ориентацию плоскости флюидоразрыва. Влияние пакеров с эластичными герметизирующими элементами усиливается тем, что давление их боковых поверхностей на стенки скважины должно быть больше давления флюида в герметизированной зоне, иначе флюид будет прорываться между пакером и стенками скважины.

Следует отметить, что подобные устройства не только оказывают негативное воздействие на стенки скважины, но и обладают свойством арматуры, препятствующей раздвижению поверхностей формируемой трещины и уменьшающей растягивающее усилие в плоскости развития трещины на величину произведения давления флюида и площади поперечного сечения скважины. При необходимости проведения флюидоразрыва в перпендикулярной скважине плоскости следует исключать герметизацию скважины распором в ее стенки эластичных элементов (оболочек). Этот вывод многократно подтвержден экспериментально. Таким образом, для проведения флюидоразрыва поперек скважины требуется решение технической задачи герметизации скважины, в которой стенки скважины не распираются герметизирующими элементами, а поверхности инициирующей щели могут свободно раздвигаться синхронно с раскрытием формируемой трещиной (не имеют жесткой связи с нагнетательной трубой).

Использование для флюидоразрыва жидкости (воды, масла, эмульсии) создает проблему неуправляемости его размерами, формой, направлением развития. Связано это со стремлением жидкости образовывать каналы для проникновения в среду с минимальными энергетическими затратами. Жидкость обладает высокой проникающей способностью, отчего с большой вероятностью внедряется в естественные трещины с произвольной ориентацией и развивает их. В результате процесс флюидоразрыва преобразуется в процесс гидравлического расчленения [4] с образованием системы извилистых каналов, по которым жидкость движется в направлении области наименьшего горного давления. Применяя динамический режим нагнетания высокоподвижной жидкости, можно решать многие практические задачи изменения среды вблизи места ее нагнетания вплоть до образования небольших сплошных трещин заданной ориентации, повышающих эффективность разрушения твердого тела за счет низкой стоимости флюида и удобства его применения (упрощения нагнетательных средств).

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПОВ ФЛЮИДОРАЗРЫВОВ**

### **Создание инициирующей щели или инициирующей трещины**

При проведении ОФР первой операцией после проходки скважины является создание инициирующей щели или инициирующей трещины, задающей ориентацию плоскости, в которой предполагают осуществлять разрыв породного массива. Плоскости флюидоразрыва с учетом возможности ориентации направления бурения задают поперек скважины (перпендикулярно ее оси) либо вдоль нее (в плоскости, проходящей через ось скважины). Преимущество разрыва поперек скважины состоит в возможности формирования трещины с размерами, не ограниченными длиной скважины. При проведении флюидоразрыва вдоль скважины упрощается совмещение

операции создания инициирующей трещины, герметизации скважины и нагнетания флюида в зону разрыва. Иницирующие щели поперек скважины прорезают специальными устройствами — щелеобразователями. Для различных условий разработано множество типов щелеобразователей, способных создавать инициирующие щели различных размеров и форм в зависимости от решения конкретных задач. Иницирующие щели в скальных породах типа гранита и его аналогов предполагается прорезать щелеобразователями, снабженными алмазными режущими органами [7]. Конструкция одного из них представлена на рис. 1. При проведении ОФР флюидами, которые отвердевают и расширяются при отверждении (лед, невзрывчатые разрушающие средства), инициирующую щель (рис. 2) создают больших размеров [8], чтобы разместить в ней флюид объемом, достаточным для формирования трещины заданной протяженности [9].

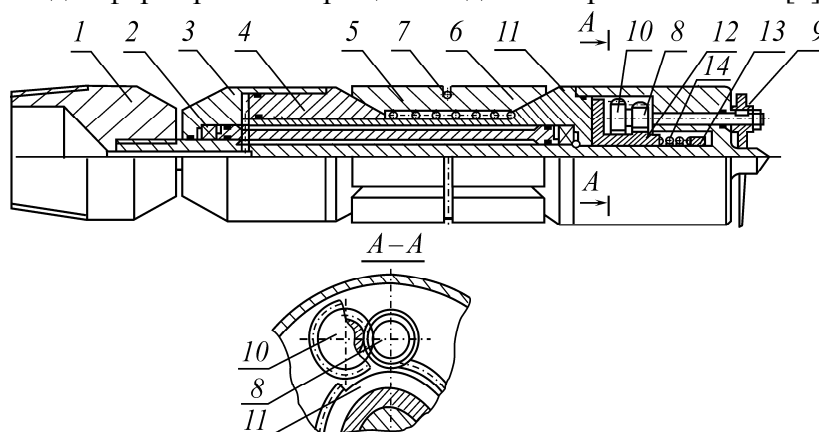


Рис. 1. Фрикционный щелеобразователь с зубчатой передачей: 1 — корпус; 2 — подшипник; 3 — цилиндр; 4 — поршень; 5 — возвратная пружина; 6 — кулачок; 7 — пружинное кольцо; 8 — ось-шестерня; 9 — режущий орган; 10 — двойная шестерня; 11 — двухсекционное зубчатое колесо; 12 — тормозная втулка; 13 — гайка; 14 — пружина

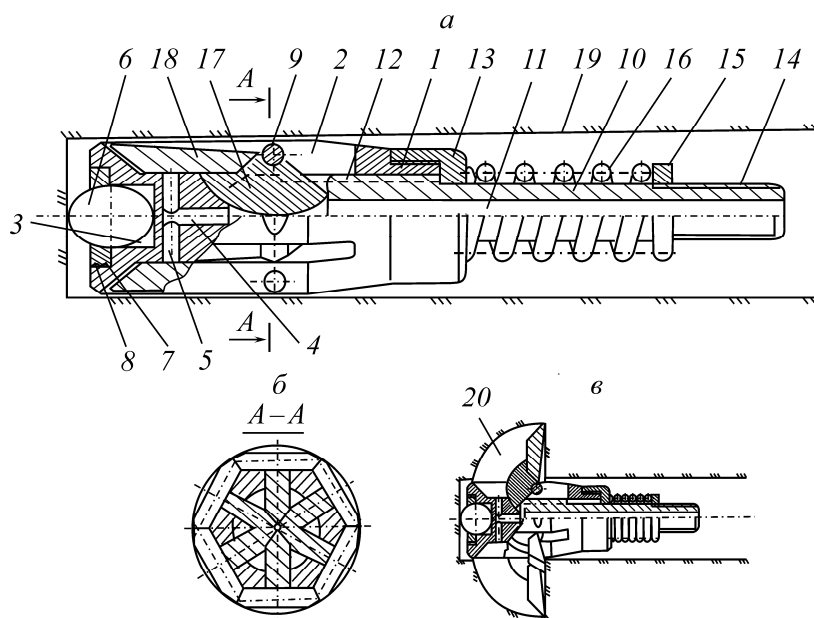


Рис. 2. Устройство для образования инициирующей щели поперек скважины: а — продольный разрез в исходном состоянии; б — разрез А-А; в — то же устройство с выдвинутыми резами, продольный разрез; 1 — корпус; 2 — полукруглые канавки; 3 — углубление; 4 — осевой канал; 5 — сквозные радиальные каналы; 6 — шаровая пята; 7 — шайба; 8 — резьба; 9 — ось; 10 — толкатель; 11 — осевое сквозное отверстие; 12 — шлиц; 13 — накидная гайка; 14 — резьба; 15 — гайка; 16 — пружина; 17 — тыльные части резов; 18 — резы; 19 — скважина; 20 — инициирующая щель

Иницирующие щели и трещины создают также для снижения начального давления разрыва горной породы за счет концентрации напряжений по линии смыкания их берегов [10]. Угол трещины определяется свойствами вмещающей среды и оказывается всегда минимально возможным, в крайнем случае меньше, чем у иницирующей щели, прорезанной механическим путем. Для снижения требований к начальному давлению разрыва горной породы целесообразно использовать иницирующие трещины (рис. 3). Их предложено создавать внедрением в стенки скважины клиньев или ударной нагрузкой через флюид на забой скважины [11, 12].

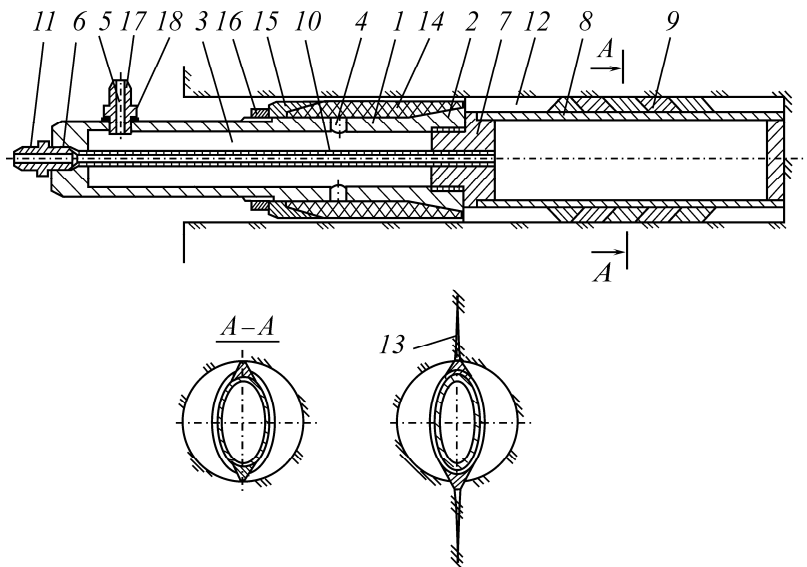


Рис. 3. Устройство для создания иницирующей трещины вдоль скважины: 1 — корпус; 2 — конический выступ; 3 — центральный канал; 4 — радиальное отверстие; 5 — отверстие; 6 — отверстие; 7 — переходная втулка; 8 — камера; 9 — клинья; 10 — трубка; 11 — штуцер; 12 — скважина; 13 — иницирующая трещина; 14 — эластичная трубка; 15 — втулка; 16 — гайка; 17 — втулка; 18 — прокладка

### Герметизация скважины и выбор флюида для разрыва горных пород

Способ герметизации скважины напрямую зависит от используемого флюида. Для твердеющих флюидов, которые при отверждении расширяются, герметизировать скважину не нужно. Для пластичных флюидов типа пластилина скважину достаточно перекрыть металлической раздвижной втулкой, внешний диаметр которой увеличивают до ее контакта со стенками скважины. Пластичное вещество обладает свойством герметика и поэтому оказывает достаточно большое сопротивление перемещению между сближенными поверхностями. Так, винтовая пара М 16 длиной 10 мм способна удерживать перепад давления в 100 МПа. Благодаря такому свойству пластичного флюида, целесообразно при проведении ОФР поперек скважины совмещать операции герметизации скважины и создания концентрации напряжений в ее стенках [13], в частности внедрением клиньев или заостренных колец пружины (рис. 4). Для проведения ОФР жидкостью необходимо исключать возможность ее утечки. При формировании трещины вдоль скважины можно использовать традиционные средства герметизации с эластичными элементами, придавливаемыми к стенкам скважины.

Для ОФР поперек скважины герметизацию осуществляют веществом, сцепляющим трубу для нагнетания флюида со стенками скважины, например цементной пробкой. При этом следует избегать двойных герметизирующих элементов, объединенных одной связующей их трубой. Обусловлено это тем, что на поперечное сечение трубы уменьшается площадь поверхностей иницирующей щели и снижается создаваемое ею усилие, а также требуется дополнительное

усилие на деформацию самой трубы для раскрытия формируемой трещины. При малом зазоре между трубой и стенками скважины для ее герметизации можно использовать вещества, расширяющиеся при отвердении. В условиях отрицательной температуры скважину эффективно герметизировать заливкой между ее стенками и трубой для подачи флюида водой. После замерзания воды образуется ледяная пробка в виде втулки, которая из-за малой толщины стенки скважины практически не распирает.

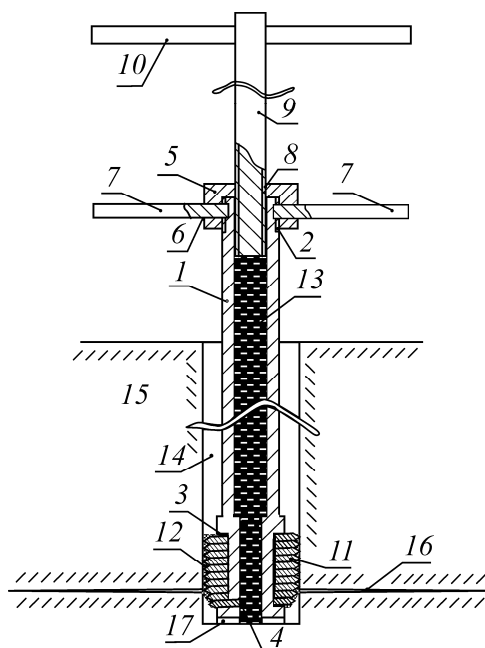


Рис. 4. Устройство для разрыва горных пород пластичным веществом поперек скважины: 1 — корпус; 2 — резьба; 3 — кольцевое углубление; 4 — радиальное отверстие; 5 — стакан; 6 — радиальное отверстие; 7 — рукоятка; 8 — центральное отверстие с резьбой; 9 — винт; 10 — рукоятка; 11 — пружина; 12 — герметизирующее вещество; 13 — пластичный флюид; 14 — скважина; 15 — породный массив; 16 — трещина; 17 — радиальные прорезы

Твердеющий флюид типа “невзрывного разрушающего средства” позволяет решать многие задачи ОФР твердых тел — отбойку блоков камня от породного массива, добычу ценного кристаллического сырья, разборку старых сооружений. Его преимущества заключаются в простоте применения, отсутствии требований герметизации скважин. К недостаткам следует отнести сравнительно высокую стоимость самого флюида, ограниченные размеры трещин, формируемых из одной скважины, необходимость выполнения большого объема буровых работ для создания одиночных сплошных трещин больших размеров. Жидкие флюиды типа воды из-за высокой проникающей способности в естественные трещины, а также невозможности создания внутри их градиента давления делают практически невозможным управление процессом ОФР. Впервые управление процессом ОФР достигнуто при использовании в качестве флюида пластичного вещества типа пластилина, который одновременно проявляет свойства жидкости и твердого тела [14, 15].

Пластичное вещество (пластичный флюид) движется внутри формируемой трещины с большим сопротивлением из-за необходимости постоянного изменения своей формы и стремлением трещины сомкнуть поверхности под действием сил упругости и внешнего давления (например, горного). Пластичное вещество не столько стремится проникнуть в трещину, сколько раздвинуть ее поверхности и разместиться ближе к месту нагнетания (скважине). В результате трещина раскрывается на столь большую величину, какую нельзя достичь известными способами

гидравлического разрыва. При этом граница (фронт) пластичного вещества отстает от границы трещины и образуется свободное “кольцевое” пространство, в котором давление практически отсутствует. Пластичное вещество раздвигает поверхности трещины, но в отличие от жидкости не воздействует на области, прилегающие к границам трещин. Оно проявляет свойство клиньев. Однако в отличие от механических клиньев, пластичное вещество изменяет свою форму и контактирует с горной породой по всей поверхности зоны заполнения трещины. Через пластичное вещество передается давление и оно подобно жидкости выполняет функцию гидравлического усилителя. Совокупность особенностей пластичного вещества обеспечивает управляемость процессом разрыва, создание трещины практически любых размеров и ориентации в горных породах любой прочности.

## **ФЛЮИДОРАЗРЫВ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ**

### **Проблемы повышения эффективности открытых горных работ методом флюидоразрыва и их решения**

Основным условием ведения горных работ является возможность отбойки горных пород. Отделять от породного массива блоки (куски) горной породы больших размеров методом гидравлического разрыва не представляется возможным. Обусловлено это разгерметизацией системы нагнетания жидкости при выходе формируемой трещины на свободную поверхность и прекращением процесса дальнейшего разрыва, необходимого для полного отделения блока от массива. Полное отделение блоков камня от массива и разделение их на части можно осуществлять флюидоразрывом пластичным веществом [16].

Пластичное вещество типа пластилина оказывает большое сопротивление его перемещению по трубопроводу. Следовательно, использовать систему нагнетания пластичного вещества, содержащую трубы большой длины, нецелесообразно из-за неоправданно больших энергетических затрат на его подачу в зону флюидоразрыва. В качестве емкости, из которой пластичное вещество подают в формируемую трещину, предложено использовать скважину, а подачу его в формируемую трещину осуществлять вытеснением из скважины штангой в режиме, адаптируемом к различным стадиям развития трещины.

Начальную трещину в плоскости предполагаемого разрыва горной породы целесообразно создавать воздействием на пластичное вещество ударной нагрузкой. При этом пластичное вещество проявляет свойство твердого тела и внедряется в разрываемую им среду в виде клина за короткое время и на малом участке. Сравнительно небольшая энергия ударной нагрузки обеспечивает создание напряжений, достаточных для образования начальной трещины в горной породе любой прочности. Для распространения ударной нагрузки в пластичном веществе необходимо затрачивать много энергии, поэтому передавать ее на значительное расстояние неэффективно. При статическом режиме нагнетания пластичного вещества и малом его расходе проявляется эффект гидравлического усиления, из-за чего малым усилием нагнетания можно создать огромное разрывающее горную породу усилие. Особенность разрушения горной породы разрывом пластичным веществом состоит также в том, что на образование начальной трещины требуется давление существенно большее, чем на ее дальнейшее развитие. Сочетание особенностей разрушения горной породы пластичным веществом и передачи через него давления обуславливает необходимость формирования начальной трещины ударной нагрузкой, а ее развитие в статическом режиме приводит к снижению энергетических затрат на образование трещины. В пластичном веществе до воздействия на него ударной нагрузкой следует создать начальное статическое давление. Это повышает его жесткость за счет уплотнения, в результате чего увеличивается коэффициент передачи ударной энергии и повышается эффективность образования начальной трещины.



Заполнение скважин следует осуществлять таким образом, чтобы в пластичном веществе отсутствовали воздушные включения, иначе оно проявляет эффект упругого элемента, отчего гасится ударная нагрузка и снижается ее эффективность. В зависимости от особенностей пластичного вещества скважины можно заполнять различными способами [17]. Например, пластичное вещество можно образовывать непосредственно в скважине из двух компонентов — жидкости и сыпучего материала. Вначале подают жидкость (воду), а затем сыпучий материал (порошок сухой глины). В скважине от взаимодействия жидкости и сыпучего материала образуется пластичное вещество. Можно использовать вещество, вязкость которого зависит от температуры. Такое вещество в виде гранул подают в скважину и разогревают до температуры, при которой оно превращается в жидкость. После остывания жидкость становится пластичным веществом, полностью заполняющим участок скважины без воздушных включений.

В первую очередь флюидоразрывы целесообразно использовать для отделения от породных массивов блоков прочных горных пород типа кимберлита, слюдита, гранита и их аналогов, отбойку которых в настоящее время осуществляют взрывными способами или с применением весьма трудоемких технологий. Кроме сравнительно низкой энергоемкости отбойки блоков от породного массива преимущества флюидоразрыва состоят также в сохранении ценных кристаллов (алмазов, изумрудов), существенном уменьшении объема буровых работ, исключении техногенных трещин, снижающих качество конечной продукции (блоков камня). Благодаря эффекту гидравлического усиления, трещину с флюидом можно использовать в качестве домкрата, способного объединять систему естественных трещин в единую поверхность, отделяющую блок любой формы и любых размеров от породного массива, что недостижимо существующими техническими средствами.

Это позволяет разрабатывать принципиально новые технологии добычи блочного камня, суть которых состоит в следующем. Отделенный от породного массива блок сложной формы и больших размеров, исчисляемых сотнями метров, с применением современных средств фотосъемки и компьютерной техники “раскраивают” на блоки требуемых размеров и формы. Затем блок методом флюидоразрыва пассируют по определенным плоскостям. В результате сокращаются потери природного камня, снижается вероятность наличия в добытых блоках естественных трещин, являющихся причиной поломки режущих органов при их дальнейшей распиловке, повышается качество продукции.

#### **Оценка геометрических параметров разрыва пластичным флюидом, вытесняемым из скважины в формируемую трещину**

Согласно результатам экспериментальных исследований [18], пластичный флюид при разрыве хрупкой среды приобретает в формируемой трещине форму эллипса. В рассматриваемом способе форма пластичного флюида до образования трещины была круглой, обусловленной поперечным сечением скважины. В процессе вытеснения пластичного флюида из скважины его форма из круглой преобразовывается в две половины “эллипса” (рис. 5), расположенные по обе стороны скважины, с общей площадью, равной площади сечения скважины, что можно выразить как  $r^2 = ab$ , где  $r$  — радиус скважины,  $a$  — малая полуось эллипса,  $b$  — большая.

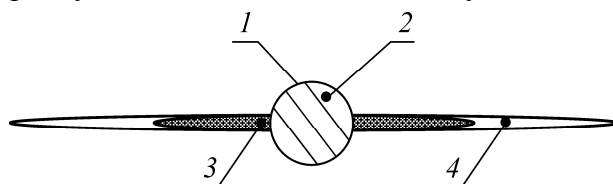


Рис. 5. Схема формирования плоской трещины вытеснением в нее пластичного флюида из скважины штангой: 1 — скважина; 2 — штанга; 3 — пластичный флюид; 4 — формируемая трещина

Малая полуось  $a$  эллипса равна половине раскрытия формируемой трещины на стенке скважины, а большая полуось  $b$  эллипса показывает глубину проникновения флюида в породный массив при одноразовом его вытеснении из скважины. При многократном вытеснении пластичного флюида из скважины следует пользоваться формулой  $nr^2 = ab$ , где  $n$  — количество раз заполнения скважины пластичным флюидом с последующим его вытеснением в формируемую трещину.

Для условий малого горного давления, к которым можно отнести неглубокие карьеры по добыче камня, соотношение протяженности формируемой трещины и глубины проникновения в нее пластичного флюида определяется механическими свойствами горной породы, режимом нагнетания флюида и сопротивлением внешнему воздействию, изменяющему его форму. Свойства пластичного флюида и режима его нагнетания (масса и высота подъема штанги) подбирают экспериментально для конкретных условий, исходя из параметров применяемого оборудования и экономической целесообразности. Протяженность трещины оценивают по глубине проникновения в нее пластичного флюида. При этом соотношение размеров трещины и зоны, занятой пластичным веществом, определяют для конкретных горных пород предварительно, в процессе выполнения работ по отбойке блоков камня от породного массива.

### **Флюидоразрыв как метод повышения эффективности подземных горных работ**

Роль флюидоразрывов в повышении эффективности подземных горных работ состоит в решении практических задач на действующих горных предприятиях, например принудительного обрушения кровли [5], дегазации угольных пластов [19], а также в создании принципиально новых скважинно-щелевых нетрадиционных технологий добычи полезных ископаемых без строительства шахт и рудников. Технический результат решения практических задач флюидоразрывом состоит в создании трещин, снижающих прочностные характеристики горной породы на заданном участке или изменяющих проницаемость вмещающей среды. Важнейшее условие успешного проведения флюидоразрыва — знание строения и состояния породного массива, его реакции на техногенное воздействие применяемой технологии, а также выбор места, с которого следует начинать формировать трещину.

Например, реакцией породного массива на техногенное воздействие технологии отработки пологих угольных пластов механизированными комплексами является стремление к обрушению кровли в выработанное пространство. При этом напряжения, компенсирующие вес кровли, распределяются по контуру выработанного пространства и концентрируются на сопряжениях выработок. В таких условиях флюидоразрыв для принудительной посадки кровли следует проводить из восстающей скважины, пройденной из сопряжения вентиляционного штрека и лавы, на уровнях плоскостей сопряжения слоев кровли. Обусловлено это следующим. Во-первых, вентиляционный штрек представляет собой сравнительно свободную выработку, в которой проведение флюидоразрыва меньше всего мешает отработке угольного пласта. Во-вторых, фронты формируемых трещин и нагнетаемый в них флюид будут двигаться преимущественно в сторону выработанного пространства как в направлении меньшего напряжения (горного давления). В-третьих, развитие трещин по плоскостям сопряжения слоев кровли происходит при меньших давлениях флюида и с требуемой ориентацией. Таким образом, над выработанным пространством снижается прочность горной породы за счет образования в ней трещин (расслоений), а к гравитационной силе, направленной на обрушение кровли, добавляется усилие, вызванное давлением флюида. В результате совмещения искусственно созданных и естественных условий для разрушения горной породы над выработанным пространством происходит обрушение кровли.

Основными составными частями нетрадиционных подземных технологий добычи полезных ископаемых являются изменение свойств вмещающей среды, например повышение ее проницаемости созданием системы каналов в виде раскрытых трещин, и изменение подвижности полезного ископаемого растворением, снижением вязкости, измельчением до возможности транспортирования потоком жидкости. Согласно многочисленным экспериментам, максимально возможное количество одновременно создаваемых в стенках скважины трещин равно трем. При этом углы между поверхностями формируемых трещин должны быть не менее  $90^\circ$ . Это обусловлено сильным взаимным влиянием трещин, существенно осложняющим управление процессом их развития. Один из возможных способов формирования трещин, удовлетворяющих указанным условиям, представлен на рис. 6 [20].

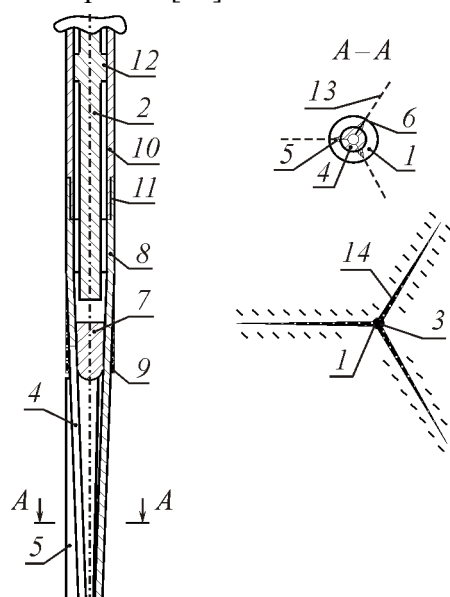


Рис. 6. Схема одновременного формирования трех продольных трещин: 1 — скважина; 2 — штанга; 3 — флюид; 4 — лепестки цанги; 5 — клинья; 6 — смыкание клиньев; 7 — наковальня; 8 — цанга; 9 — эластичная втулка; 10 — труба; 11 — резьба; 12 — кольцевой выступ; 13 — плоскость разрыва; 14 — трещина; A-A — разрез

Для формирования трещин в скважину опускают устройство с цангой, на лепестках которой вдоль их боковых граней установлены клинья, образующие при взаимных контактах заостренные вершины. Лепестки раздвигают стержнем (наковальней), по которому наносят удары штангой, разгоняемой в режиме свободного падения, отчего в стенках скважины образуются инициирующие трещины. Затем эти трещины развивают до нужных размеров нагнетанием в них флюида с расклинивающими частицами. В результате в породном массиве образуются раскрытые трещины, которые используют в качестве каналов для притока к скважине полезного ископаемого, например нефти. Изменение подвижности полезного ископаемого до состояния, обеспечивающего возможность его извлечения через скважину, осуществляют с использованием физических и химических принципов.

#### ПРИМЕНЕНИЕ ФЛЮИДРАЗРЫВОВ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В настоящее время применяются наиболее простые способы флюидоразрывов, проводимых с целью повышения проницаемости среды созданием в ней гидравлически связанных между собой систем трещин и снижения устойчивости отдельных участков породных массивов путем

формирования в них плоскостей ослабления. Технология осуществления флюидоразрывов сводится к образованию начальной трещины с нужной ориентацией и последующему нагнетанию в нее флюида. Наибольшую известность получили флюидоразрывы для повышения дебита нефтяных скважин, что связано с их успешным применением в США в технологиях разработки нефтяных месторождений. Флюидоразрывы используются в современных технологиях разработки угольных месторождений, в основном для принудительного обрушения кровель в выработанное пространство и предварительной дегазации угольных пластов.

Первый флюидоразрыв для решения конкретной производственной проблемы на подземном горном предприятии проведен в Кузбассе на шахте “Алардинская” в 1983 г. Добыча угля на шахте производилась по схеме вскрытия пластов: наклонными стволами (уклонами) по пластам. Схема подготовки — панельная, система разработки — длинные столбы по простиранию, короткие и наклонные выемочные столбы, все — с полным обрушением кровли. Очистные работы велись с применением механизированного комплекса. В 1983 г. планируемая посадка кровли из-за ее высокой прочности над выработанным пространством не происходила. Это привело к запредельным нагрузкам на механизированный комплекс с угрозой его потери. Известные способы и средства принудительной посадки кровли не дали положительных результатов. Руководство шахты обратилось за помощью в ИГД СО РАН, где был разработан метод управления кровлей ориентированного флюидоразрыва [21].

Подробное описание реализации указанного метода и специально созданных для этого технических средств и способа контроля распространения формируемой трещины на шахте “Алардинская” приведены в [22]. В результате проведенного ОФР произошло обрушение кровли и условия отработки угольного пласта нормализовались. Успешное применение ОФР на шахте “Алардинская” инициировало его распространение на другие шахты [23].

#### **ВЫВОДЫ**

Роль флюидоразрывов в повышении эффективности подземных горных работ состоит в решении практических задач на действующих горных предприятиях и создании принципиально новых скважинно-щелевых нетрадиционных технологий добычи полезных ископаемых без строительства шахт и рудников. Основным условием указанных технологий является изменение свойств вмещающей среды и подвижности полезного ископаемого.

Благодаря эффекту гидравлического усиления, трещину с флюидом можно использовать в качестве домкрата, способного объединять систему естественных трещин в единую поверхность, отделяющую блок любой формы и любых размеров от породного массива, что недостижимо существующими техническими средствами.

Автор благодарит Е. Н. Шера за большую помощь в написании настоящей статьи.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Griffith A. The phenomena of rupture and flow in solids, *Fransoctions: Royal Society of London*, 1921, Vol. 221. — P. 163–198.
2. [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Гидравлический разрыв пласта](https://ru.wikipedia.org/wiki/Гидравлический_разрыв_пласта).
3. Желтов Ю. П., Христианович С. А. О гидравлическом разрыве нефтяного пласта // *Изв. АН СССР*. — 1955. — № 5. — С. 3–41.
4. Ножкин Н. В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. — М.: Недра, 1979. — 271 с.
5. Чернов О. И. Гидродинамическая стратификация монолитных пород в качестве способа управления труднообрушающейся кровлей // *ФТПРПИ*. — 1982. — № 2. — С. 18–23.

6. **Современная геодинамика** массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / В. Н. Опарин, А. Д. Сашурин, Г. И. Кулаков, А. В. Леонтьев, Л. А. Назаров и др. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 449 с.
7. **А. с. 1055874 СССР.** Устройство для образования зародышевых трещин в скважинах / М. В. Курленя, Н. Г. Кю, О. И. Чернов, Е. И. Шемякин, Л. Н. Шепелев. — Открытия. Изобретения, опубл. 23.11.1983.
8. **Пат. 2011780 РФ, МКИ E21B 7/28.** Расширитель концевой части шпура / Н. Г. Кю, О. И. Чернов, Л. Н. Шепелев. — Открытия. Изобретения, опубл. 30.04.1994.
9. **А. с. 1074995 СССР, МКИ E21C 37/00.** Способ разрушения твердого материала / О. И. Чернов, Е. И. Шемякин, М. В. Курленя, Н. Г. Кю. — Открытия. Изобретения, опубл. 23.02.1984.
10. **Баренблатт Г. И., Христианович С. А.** О модуле сцепления в теории трещин // Изв. АН СССР. — МТТ. — 1968. — № 2. — С. 70–75.
11. **Пат. 2081314 РФ, МКИ E21C 37/06, E21C 37/02.** Устройство для образования направленных трещин в скважинах / Н. Г. Кю, О. И. Чернов, Л. Н. Шепелев. — Открытия. Изобретения, опубл. 10.06.1997.
12. **Пат. 2182968 РФ, МКИ E21C 37/12.** Устройство для образования направленных трещин в скважинах / Н. Г. Кю, А. В. Новик, А. М. Фрейдин. — Открытия. Изобретения, опубл. 27.05.2002.
13. **Пат. 2230185 РФ, МКИ E21B 43/26.** Скважинное устройство для образования направленных трещин / Н. Г. Кю. — Открытия. Изобретения, опубл. 10.06.2004.
14. **Чернов О. И., Кю Н. Г.** Экспериментальное изучение ориентированного разрыва твердых тел высоковязким флюидом // ФТПРПИ. — 1996. — № 5. — С. 28–34.
15. **Кю Н. Г.** Особенности разрушения горных пород при флюидоразрыве пластичным веществом // ФТПРПИ. — 2011. — № 4. — С. 39–50.
16. **Кю Н. Г., Фрейдин А. М., Чернов О. И.** Добыча блочного камня методом флюидоразрыва горных пород // Горн. журн. — 2001. — № 3. — С. 71–75.
17. **Пат. 2351761 РФ, МКИ E21C 37/02.** Способ разрушения горных пород (варианты) / Н. Г. Кю. — Открытия. Изобретения, опубл. 10.04.2009.
18. **Чернов О. И., Кю Н. Г.** Скважинно щелевой способ дегазации не разгруженных от горного давления угольных пластов // ФТПРПИ. — 1997. — № 3. — С. 98–104.
19. **Пат. 2311533 РФ, МКИ E21C 37/12, E21B 43/26, E21F 7/00.** Способ разрушения горных пород и устройство для его осуществления / Н. Г. Кю. — Открытия. Изобретения, опубл. 27.11.2007.
20. **А. с. 825962 СССР, МКИ E21C 41/04.** Способ управления труднообрушаемой кровлей / Г. Ф. Бобров, Г. Е. Посохов и О. И. Чернов. — Открытия. Изобретения, опубл. 30.04.1981.
21. **Чернов О. И., Фролов Б. А., Красников С. Я., Шепелев Л. Н.** Результаты экспериментов по гидродинамической стратификации монолитного породного массива с целью его разупрочнения // ФТПРПИ. — 1985. — № 6. — С. 74–78.
22. **Леконцев Ю. М., Сажин П. В.** Применение метода направленного гидроразрыва на шахте “Березовская” // ФТПРПИ. — 2008. — № 3. — С. 34–40.
23. **Клишин В. И., Зворыгин Л. В., Лебедев А. В., Савченко А. В.** Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. — Новосибирск: Изд. дом “Новосибирский писатель”, 2011. — 524 с.

*Поступила в редакцию 1/XII 2016*