

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.83:556.3:622.5

### ПРОРЫВ ВОДЫ В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ КАК СЛЕДСТВИЕ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА МАССИВА ПОРОД

**В. Н. Одинцев, Н. А. Милетенко**

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: Odin-VN@yandex.ru,  
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Исследуются случаи прорыва воды в горные выработки как следствия самопроизвольного гидроразрыва массива пород. Разработана модель гидроразрыва, в которой трещина растет под давлением подземной воды в области техногенного снижения напряжений массива. Модель включает два критерия развития трещины — критическое растяжение породы в кончике трещины и открытость трещины по всей длине. Установлено, что определяющую роль в развитии трещин самопроизвольного гидроразрыва играют особенности природного и техногенного полей напряжений, гидростатическое давление подземной воды и порядок проведения выработок.

*Горные выработки, подземные воды, прорывы воды, гидроразрыв, численное моделирование*

Техногенные гидрогеологические изменения в массиве пород при разработке полезных ископаемых большей частью связаны с медленными процессами просачивания воды по трещино-порам, контактам структурных блоков, тектоническим нарушениям и т. п. Однако иногда происходят внезапные, катастрофические прорывы воды в горные выработки с динамическим выносом в выработку разрушенной породы. Вода может прорываться в выработки из водоемов, находящихся на земной поверхности, неосушенных водоносных горизонтов, затопленных выработок, скоплений воды в действующих выработках и т. д.

Для предотвращения прорывов воды в горные выработки разработаны определенные правила работы на горных предприятиях со сложной гидрогеологической обстановкой. Для угольных шахт методика установления границ опасных зон и требования к проектам ведения горных работ в этих зонах изложены в инструкции [1], где приведены также соотношения для оценки границ опасных зон. В формулу, определяющую ширину опасной зоны у затопленной выработки, входят расстояние по вертикали от земной поверхности до пласта в опасной зоне, коэффициент, зависящий от крепости пород, высота подготовительной выработки и погрешность положения затопленной выработки.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-05-00482).

Во многих исследованиях, посвященных рассматриваемому вопросу, отмечается, что прорывы воды зависят также от ряда факторов, которые не учитываются в простой формуле, приведенной в [1], например от технологических, физических, геодинамических и геологических. Именно многообразии факторов влияния затрудняет изучение механизма внезапных прорывов и разработку предупредительных мероприятий [2].

Традиционно для теоретического исследования техногенных гидрогеологических изменений использовалась теория фильтрации [3]. Однако в рамках этой теории невозможно прогнозировать многие случаи движения воды в массиве пород, поскольку оно часто связано с техногенным изменением и разрушением массива, которое не учитывается в этой теории. Например, проникновение воды в массив может происходить при природном или техногенном гидроразрыве пород с образованием магистральной трещины [4–8], в которой вода течет по закону гидродинамики. Главной силой разрушения является вода, заполняющая трещину.

Гидроразрыв горных пород как геомеханическое явление и средство управления состоянием массива в настоящее время исследуется на стыке геомеханики, гидрогеологии, гидродинамики, физической химии и механики разрушения. Особенность рассматриваемого здесь гидроразрыва пород в отличие от классического технологического гидроразрыва заключается в том, что давление воды неизменно, а напряжения в массиве уменьшаются в результате проведения горных работ. Действительно, при техногенном перераспределении напряжений одна из главных компонент сжимающих напряжений в некоторой области массива может стать малой. Если в этой области оказывается трещина, заполненная подземной водой, гидростатическое давление которой выше минимального сжимающего напряжения, то трещина будет развиваться за счет распирающего действия воды. Эту трещину можно назвать трещиной самопроизвольного гидроразрыва.

В исследовании особенностей самопроизвольного гидроразрыва можно использовать “богатую” методику исследований технологического, управляемого гидроразрыва массива горных пород с соответствующими наработками в методологии моделирования [5–16]. Рассмотрим методику моделирования самопроизвольного гидроразрыва пород и случаи прорыва воды на двух угольных шахтах.

#### МОДЕЛЬ ГИДРОРАЗРЫВА ПОРОД ПОД ВЛИЯНИЕМ ЗАТОПЛЕННОЙ ВЫРАБОТКИ

Существуют различные модели гидроразрыва пород [12], однако общим феноменологическим условием гидроразрыва является то, что давление воды на берегах трещины должно быть выше сжимающего напряжения, действующего в породе нормально трещине. Простейшее условие гидроразрыва может быть записано так

$$p \geq \sigma + T, \quad (1)$$

здесь  $p$  — давление воды в трещине;  $\sigma$  — напряжение, действующее в направлении нормали к трещине (напряжения сжатия приняты положительными);  $T$  — прочность породы на растяжение. Условие (1) справедливо для достаточно протяженной трещины, когда становится несущественным условие зарождения трещины. На этапе зарождения трещины условие гидроразрыва включает характерные особенности распределения напряжений вблизи объекта, содержащего воду под давлением. Например, в случае продольного гидроразрыва стенки скважины условие начала гидроразрыва имеет вид

$$p \geq 3\sigma_3 - \sigma_1 + T, \quad (2)$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  — наибольшая и наименьшая главные компоненты сжимающих напряжений, действующих нормально оси скважины.

Если для описания гидроразрыва используется теория трещин нормального разрыва, то рассматриваются такие параметры, как коэффициент интенсивности напряжений в кончике трещины  $K_I$ , критическое значение этого коэффициента  $K_{IC}$  (параметр трещиностойкости) и длина трещины  $l$ . В этих параметрах условие начала гидроразрыва, соответствующее соотношению (2), представляется в виде [12]

$$p \geq \frac{1}{2}[3\sigma_3 - \sigma_1] + \frac{K_{IC}}{2\alpha\sqrt{\pi l_0}}, \quad (3)$$

здесь  $l_0$  — длина начальной трещины (дефекта);  $\alpha$  — параметр, значение которого зависит от соотношения длины начальной трещины и диаметра скважины. Этот параметр определяется из соответствующей таблицы. Последнее слагаемое в (3) соответствует прочности породы на растяжение. Принципиальное отличие условий (3) и (2) заключается в наличии множителя  $\frac{1}{2}$  перед квадратной скобкой в (3), что связано с учетом полного заполнения начальной трещины водой и распирающего действия воды на трещину. С помощью теории трещин можно более детально рассматривать условия и соотношения, определяющие развитие трещины и, в частности, рассчитывать криволинейную траекторию развития трещины.

В данной работе будем исходить из упрощенных представлений о процессе разрушения и заполнения трещины водой. Порода считается упругой и изотропной. Условия внешнего нагружения массива пород, геометрические особенности выработок и трещины отвечают условию плоской деформации массива. Считаем также, что трещина гидроразрыва является разрывом сплошности породы, который свободно заполняется водой на всю длину разрыва, так что в затопленной выработке и во всей трещине задается постоянное гидростатическое давление  $P$ . Подрастание трещины означает увеличение длины разрыва и задание на образованных поверхностях разрыва дополнительной нормальной распирающей нагрузки от действия воды.

Возможность приращения длины трещины в ее кончике определяется локальным критерием разрушения Гриффитса–Ирвина, который в простейшем случае для трещин нормального разрыва имеет вид [17]

$$K_I \geq K_{IC}. \quad (4)$$

Коэффициент интенсивности растягивающих напряжений в кончике трещины  $K_I$  находят в результате решения задачи о напряженном состоянии породы, а критическое значение  $K_{IC}$  — из соответствующей таблицы.

В теории трещин обычно полагается, что направление приращения длины трещины определяется из постулата Е. Иоффе [18]. Если ввести полярные координаты  $r$ ,  $\theta$ , то согласно этому постулату, трещина начинает распространяться в направлении, перпендикулярном направлению действия максимальных растягивающих окружных напряжений в кончике трещины  $\sigma_\theta$ , когда величина  $\sigma_\theta$  на некотором расстоянии от вершины достигнет критического значения. Это направление соответствует направлению действия одного из главных напряжений, другое главное напряжение действует в перпендикулярном направлении.

Следуя постулату Е. Иоффе, логично заключить, что если отсутствуют явные природные нарушения массива, то трещина самопроизвольного гидроразрыва должна развиваться в том направлении (изменяющимся под действием техногенных факторов), где давление воды максимально превышает наименьшее напряжение сжатия. Проведенные исследования показывают, что для сжатого массива пород это заключение не всегда справедливо. При развитии трещины должно выполняться условие ее открытости (расхождения берегов) по всей ее длине. Если в процессе развития трещины берега в некоторой части начинают смыкаться вследствие перераспределения напряжений, то это останавливает проникновение воды в кончик трещины и, следовательно, дальнейшее развитие трещины невозможно.

Таким образом, условие развития трещины самопроизвольного гидроразрыва задается двумя независимыми критериями, а именно локальным, определяющим возможность и спектр направлений приращения длины трещины, и интегральным, определяющим возможность существования открытой трещины по всей ее длине. Первый критерий записывается соотношением (4), второй — соотношением  $p \geq \sigma$ , вытекающим из (1).

В настоящей работе математическая модель развития трещины основывается на методе конечных элементов (МКЭ), что позволяет использовать многочисленные наработки этого метода в механике деформированного твердого тела. Однако в МКЭ рассматриваются конечные элементы и определение коэффициента  $K_I$  как коэффициента при “бесконечности” затруднено. Поэтому здесь используется следующий прием: на каждом шаге вычислений кончик трещины представляется автономной областью — тонким разрезом с прямыми углами (рис. 1а). Длина автономной области  $s$ , толщина  $h$  постоянны, при этом  $h = 0.1 s$ ,  $s \ll l$ .

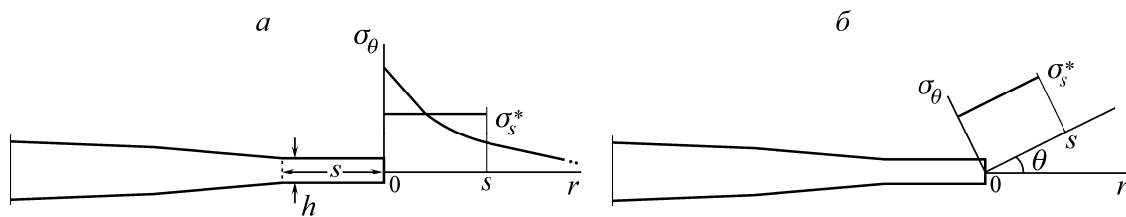


Рис. 1. Схема для анализа критерия и направления развития трещины: а — геометрия автономного кончика трещины; б — система координат, связанная с вершиной трещины

На каждом шаге приращений длины трещины определяется напряженное состояние во всей области исследования и, в частности, в районе кончика трещины. Пусть направление действия одного из главных напряжений совпадает с осью  $r$  (рис. 1а). В нормальном направлении действует другое главное напряжение  $\sigma_\theta$ , которое для трещины нормального разрыва должно быть напряжением растяжения. Распределение этого напряжения вдоль оси  $r$  вблизи тупого конца трещины условно показано кривой линией. На оси симметрии автономного кончика  $r$  рассматривается отрезок длиной  $s$  и на нем определяется среднее значение главного напряжения растяжения  $\sigma_\theta$ , которое обозначим  $\sigma_s^*$ .

Можно показать, что локальный критерий развития трещины (4), справедливый для трещин с острым концом, в рассматриваемом случае при усреднении напряжений в конечных элементах может быть преобразован к виду

$$\sigma_s^* \geq K_{IC} \sqrt{2/(\pi s)}. \quad (5)$$

Значение левой части в этом критерии можно найти в результате расчета, правая часть содержит константу геоматериала и параметр численной модели  $s$ . Значение параметра  $s$  можно найти из решения тестовой задачи, в которой используется критерий (3) и оценивается условие начала развития начальной трещины длиной  $s$ . В качестве тестовых задач использованы задачи, рассмотренные в работах [12–14] и повторно решенные в рамках нашей модели.

Из анализа локального распределения главных напряжений вблизи кончика трещины определяется сектор возможных направлений локального приращения длины трещины. На каждом из этих направлений, задаваемых углом  $\theta$  (см. рис. 1б), выполняется критерий (5).

Для расчета направления и приращения длины трещины в используемой процедуре вычислений сначала находится направление, определяемое постулатом Е. Иоффе, и максимально возможное на этом направлении приращение. Далее проводится расчет напряженного состояния

пород с учетом увеличившейся длины трещины, а затем оценка открытости трещины по всей ее длине. Если это условие выполняется, то реализуется следующий шаг в построении траектории развития трещины. В противном случае, если трещина где-либо закрывается, выбирается новое направление приращения трещины, близкое к уже рассмотренному, для которого выполняется критерий (5). Снова проверяется условие открытости трещины. Если оказывается, что любое возможное приращение трещины ведет к ее частичному закрытию, то трещина считается остановившейся в росте. Следует заметить, что эта трещина может снова начать развитие, если в результате техногенного перераспределения напряжений, например при увеличении выработанного пространства, реализуются условия для ее открытия.

Таким образом, процедура расчета траектории развития трещины гидроразрыва пород от резервуара воды, например от затопленной выработки, включает в себя следующие этапы:

— определение с помощью МКЭ техногенного напряженного состояния массива пород вблизи затопленной выработки при известном гидростатическом давлении воды  $p$ ;

— решение модельной тестовой задачи о начале гидроразрыва рассматриваемой породы на стенке скважины, находящейся в условиях, соответствующих затопленной выработке. Определение численных значений параметров расчетной модели  $s$  и  $h$  на основе анализа решения тестовой задачи;

— задание в точке минимального сжатия породы на стенке затопленной выработки начальной трещины — нормально ориентированного к поверхности тонкого разреза длиной  $s$  и толщиной  $h$ . Решение задачи о выработке, заполненной водой, с начальной трещиной;

— анализ полученного решения в отношении возможности и направления приращения длины начальной трещины. В случае возможного развития трещины — задание новой геометрии трещины и распирающей нагрузки  $p$  на ее берегах;

— расчет напряженного состояния массива пород при новой геометрии трещины, анализ напряжений в кончике трещины и определение нового направления приращения длины трещины, если выполняется условие роста трещины и условие открытости трещины;

— последний пункт процедуры повторяется многократно, на основе решений соответствующих задач по совокупности приращений длины трещины определяется траектория развития трещины.

Процесс развития трещины нелинейный, поскольку текущие условия развития трещины зависят от формирующейся геометрии трещины и истории изменения техногенного напряженного состояния массива пород. Используемая в расчетах плоская модель МКЭ содержит несколько десятков тысяч элементов с интенсивной разбивкой области исследования в районе кончика трещины, что позволяет достаточно точно определять напряжения вблизи автономного кончика трещины.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА

*Проверка модели.* Модель трещины гидроразрыва и процедура расчета траектории трещин прошли проверку при моделировании траекторий трещин гидроразрыва, построенных в [12, 13] с помощью метода граничных элементов и метода интегральных сингулярных уравнений. В этих работах рассматривались трещины гидроразрыва, растущие из скважин, при различных соотношениях сжимающих напряжений, действующих “на бесконечности”  $\lambda = \sigma_x^0 / \sigma_y^0$ , и углов наклона  $\varphi$  к оси  $OX$  начальных трещин на стенке скважин. В качестве критерия роста трещины использовалось условие (3). На рис. 2 тонкими линиями, отмеченными буквой  $a$ , показаны траектории трещин для следующих случаев: ( $\lambda = 0.8$ ) 1 —  $\varphi = 60^\circ$ ; 2 —  $45^\circ$ ; 3 —  $30^\circ$ ; 4 —  $15^\circ$  [13]; 5 — ( $\lambda = 0.5$ ),  $\varphi = 60^\circ$  [12].

При тех же условиях задач с помощью процедуры, описанной выше, построены траектории трещин, показанные более толстыми линиями, отмеченные буквой *б*. Как видно, построенные кривые имеют тот же качественный вид, что и соответствующие кривые, построенные другими способами. Расхождения соответствующих точек не превышают 10% от диаметра скважины.

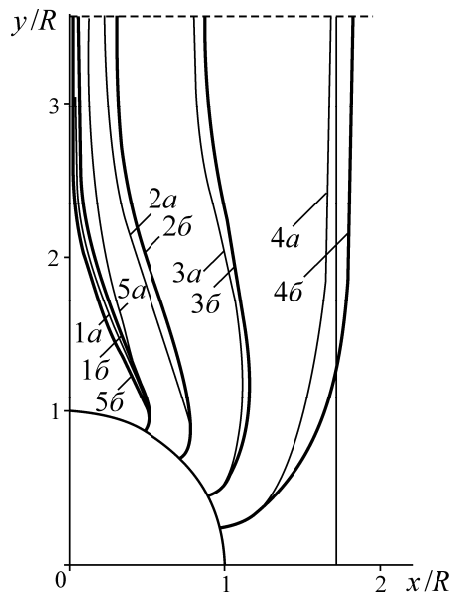


Рис. 2. Полученные численными методами траектории трещин гидроразрыва, исходящих из скважин при различных начальных условиях (пояснения в тексте)

Кроме того, для апробации модели использовались результаты работы [14], в которой построены траектории трещин гидроразрыва, начинающиеся на горизонтальной свободной поверхности откоса пород и выходящие на откос при различных углах наклона откоса и углах наклона начальных трещин к поверхности. В проведенных нами расчетах получены подобные траектории развития трещин. Расхождение кривых не превышало 10% от характерного размера задачи. По рассмотренным примерам можно сделать вывод о возможности применения рассмотренной процедуры расчета траекторий развития трещин гидроразрыва для анализа условий развития трещин из подземных резервуаров воды.

*Моделирование случаев из практики. Пример 1.* Разработанная модель природно-техногенного гидроразрыва использована при анализе механизма ряда известных из практики случаев динамического прорыва воды в рабочие выработки, два из которых рассматриваются ниже. В первом примере исследуется случай прорыва воды в вентиляционный штрек из затопленной скважины, находящейся в его борту. Этот случай произошел на шахте “Октябрьская” при отработке угольного пласта “Полысаевский-2”. Схема события показана на рис. 3. Мощность пласта ~ 3 м. Непосредственная кровля — алевролит со средней мощностью 11 м, основная — песчаник мощностью 25 м. Давление массы налегающих пород 6 МПа, горизонтальные напряжения в соответствии с гипотезой А. Н. Динника [19] равны 2 МПа, давление воды в скважине в районе штрека 0.4 МПа, диаметр скважины 10 см, модуль упругости породы  $5 \cdot 10^3$  МПа, коэффициент Пуассона 0.2.

Дегазационная скважина 2, пробуренная через затопленный горизонт 1, расположена примерно в 1 м от вентиляционного штрека 5, в боковой стенке которого имелись небольшие трещины 8. При отработке пласта 6 одна из природных трещин выросла до значительных размеров. В результате произошло масштабное обрушение стенки вентиляционного штрека и затопление выработки вследствие недостаточной производительности насосной установки.

Анализ ситуации заключался в расчете напряженно-деформированного состояния массива пород с использованием процедуры моделирования развития трещин гидроразрыва. Рассматривались зародышевые трещины, исходящие от скважины по различным направлениям, а также небольшие трещины на боковой поверхности штрека.

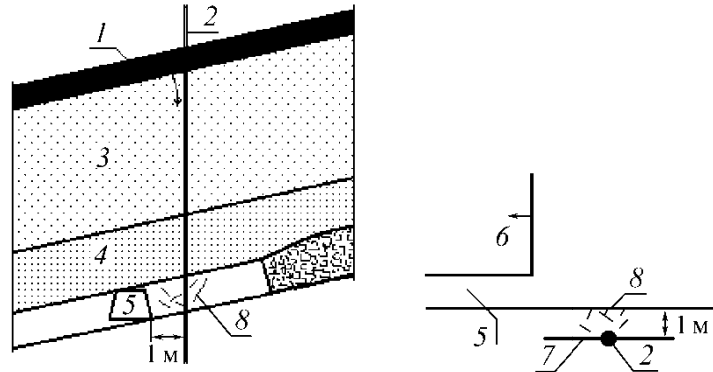


Рис. 3. Схема ситуации на шахте “Октябрьская”: 1 — затопленный горизонт; 2 — дегазационная скважина; 3 — песчаник; 4 — алевролит; 5 — вентиляционный штрек; 6 — разрабатываемый пласт; 7 — трещина гидроразрыва; 8 — трещины в борту штрека

На рис. 4 представлены некоторые результаты расчета: а) главное напряжение  $\sigma_3$ , ответственное за развитие макротрещины гидроразрыва (вблизи кончика трещины это напряжение растягивающее); б) сглаженная траектория развития трещины. Эти результаты относятся к одному из вариантов расчета при наличии двух природных трещин на поверхности штрека длиной 0.4 м и наклоненных к поверхности под углами 60 и 30°. Длина трещины составляет около 7 м.

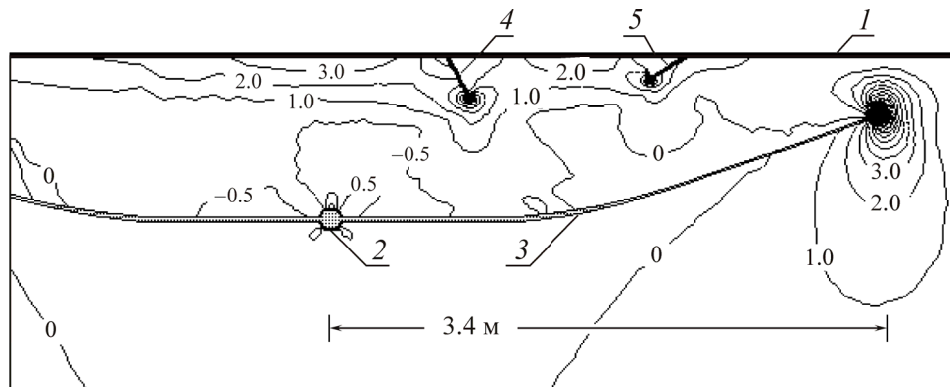


Рис. 4. Изолинии главного напряжения  $\sigma_3$  (МПа) вблизи трещины гидроразрыва: 1 — поверхность боковой стенки штрека; 2 — скважина; 3 — трещина гидроразрыва; 4, 5 — трещины на поверхности штрека

По результатам моделирования, в ходе которого исследовалось также влияние горизонтального напряжения и положения начальных трещин-дефектов на свободной поверхности и вблизи скважины, можно сделать следующие выводы. Если горизонтальное напряжение мало в сравнении с давлением воды, то трещина гидроразрыва развивается в направлении нормали к стенке выработки. Если это напряжение превышает давление воды в 5 раз, как в рассматриваемом примере, то на начальном этапе макротрещина гидроразрыва должна расти вдоль свободной поверхности, пока ее длина не станет соизмеримой с расстоянием до поверхности. Затем трещина плавно изменяет направление и растет примерно под углом 15° в направлении

к поверхности. В конечном итоге она может выйти на поверхность. Наличие небольших отдельных изолированных трещин слабо влияет на общую тенденцию развития макротрещины гидроразрыва.

Ситуация с выходом трещины гидроразрыва на поверхность возможна, однако разрушение слоя пород, разделяющего трещину гидроразрыва и боковую стенку штрека, может произойти раньше, чем трещина выйдет на поверхность. Давление воды на разделяющий слой приводит к сильной деформации и изгибу этого слоя, напряженное состояние которого также зависит от горизонтального сжимающего напряжения и длины трещины гидроразрыва.

Как показал расчет, при указанных параметрах задачи для трещины гидроразрыва длиной около 7 м разрушение разделяющего слоя пород по механизму сдвига в районе конца трещины гидроразрыва более реально, чем выход этой трещины на поверхность или прорастание поверхностных трещин-дефектов к трещине гидроразрыва. Действительно, касательное напряжение вблизи конца трещины достигает 12 МПа и превышает предел текучести нарушенного угля, оцениваемый в 8 МПа. Возможно сдвиговое разрушение слоя в районе конца трещины, последующее макроразрушение слоя и беспрепятственное поступление воды из скважины в выработку.

Выявляемые в расчетах характерные особенности разрушения массива пород и геометрические параметры области разрушения соответствуют данным натурных оценок произошедшего события. Это свидетельствует об адекватности разработанной модели.

*Пример 2.* Во втором примере исследовался более крупный по масштабу разрушений прорыв воды в лаву из нижележащей затопленной выработки. Этот случай произошел на шахте “Центральная”. Схематично ситуация, предшествующая прорыву, показана на рис. 5.

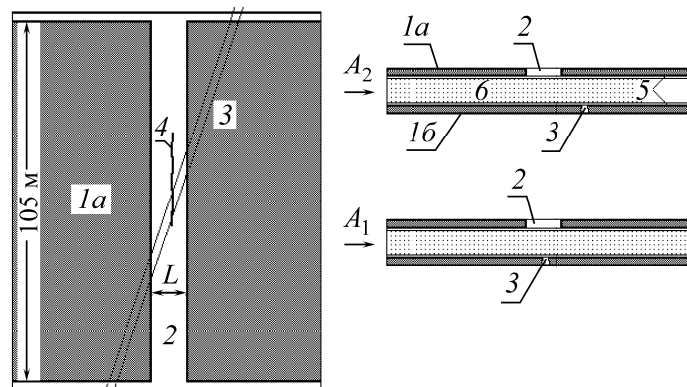


Рис. 5. Схема условий прорыва воды в плане и по различным сечениям  $A_1$ ,  $A_2$  междупластья:  $1a$ ,  $1б$  — угольные пласты; 2 — лавы; 3 — затопленный уклон; 4 — трещина в почве лавы; 5 — слабые породы; 6 — прочные породы

Мощность верхнего пласта  $1a$  равна 1.5 м, глубина в месте прорыва воды 450 м. Ниже пласта  $1a$  на расстоянии 9 м расположен другой угольный пласт  $1б$ , в котором диагонально к простиранию пласта находится затопленная выработка (уклон) 3 с напором воды 1 МПа. Непосредственно в почве разрабатываемого верхнего пласта и в кровле нижележащего пласта размещены пласты глинистого сланца 5 мощностью около 1 м и прочностью 10 МПа. Основные породы междупластья 6 составляли песчаник и гравелит со средней прочностью 50 МПа.

На одном из этапов развития очистных работ в почве лавы 2 возникло вспучивание и образование продольной трещины 4, уходящей вглубь междупластья. При увеличении пролета выработанного пространства  $L$  через эту трещину произошел прорыв воды с динамическим эффектом.



Геомеханический анализ условий прорыва заключался в следующем. Сначала исследована ситуация до начала очистных работ. Проведен расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород с оценкой возможности развития трещины гидроразрыва, исходящей от затопленной выработки 3. Рассмотрена выработка трапециевидной формы высотой 1.75 м и с углом наклона боковых стенок  $75^\circ$ . Расчет проводился при условии плоской деформации массива. Массив междупластья в расчетах принимался однородным по деформационным свойствам с модулем упругости  $10^4$  МПа, коэффициентом Пуассона 0.23, но неоднородным по свойствам трещиностойкости. Значение  $K_{IC}$  для прочных пород принималась равным  $0.5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , для слабых пород — в 5 раз меньше. Вертикальная нагрузка в задаче определялась весом налегающих пород, имеющих усредненную плотность  $2100 \text{ кг/м}^3$ . Горизонтальное напряжение в нетронутом массиве в соответствии с гипотезой А. Н. Динника принималось равным 3 МПа.

Расчеты показали, что при затоплении выработки в ее кровле и почве образуются зоны растяжения породы, что объясняется невысоким боковым сжатием и плоской формой обнажений пород. В этих зонах возможно зарождение трещин гидроразрыва. В условиях задачи в центральной части плоской кровли затопленной выработки может образоваться вертикальная трещина гидроразрыва, длина которой составляет около 20 см.

Затем моделировалась ситуация с развитием очистных работ, для чего в задачах расчета НДС рассматривалась горизонтальная прямоугольная выработка (лава), расположенная выше затопленной выработки на 9 м (рис. 5). Пролет лавы  $L$  скачкообразно увеличивался на 5 м от 0 до 30 м. Рассматривались плоские задачи для двух случаев, которые соответствуют сечениям  $A_1$ ,  $A_2$  и характеризуют положения соосного и смещенного сечений лавы и затопленной выработки. В совокупности эти случаи позволяют осмыслить трехмерную картину развития трещинообразования.

Очевидно, что увеличение пролета лавы увеличивает область перераспределения напряжений и область техногенных изменений в массиве пород. В задаче соосного положения лавы и затопленной выработки установлено, что лава начинает заметно влиять на условия развития трещин гидроразрыва с момента, когда ее пролет составит 20 м. При этом влияние лавы таково, что вначале у затопленной выработки формируется зона дополнительного горизонтального сжатия, наведенная лавой, и образовавшаяся ранее в кровле вертикальная трещина гидроразрыва должна закрыться.

При дальнейшем увеличении пролета лавы зона растяжения породы начинает формироваться вблизи боковой стенки затопленной выработки. При пролете лавы 25 м у боковой стенки возможно образование трещины гидроразрыва длиной около 25 см, ориентированной нормально стенке. Образование трещины возможно у правой и у левой стенок. Здесь рассматривается ситуация с образованием одной трещины, поэтому в последующих расчетах не соблюдаются условия симметрии относительно вертикальной оси.

При пролете лавы, равном 30 м, наименьшие сжимающие напряжения в массиве пород снижаются так, что трещина гидроразрыва начинает неустойчиво расти, поворачивая в сторону лавы. На рис. 6 показана траектория трещины перед входом ее в лаву и изолинии главного напряжения  $\sigma_3$ , входящего в критерий развития трещины.

Как следует из расчетов, в почве лавы в области контакта слабых и прочных пород вертикальные и горизонтальные напряжения близки нулю. В то же время касательные напряжения в районе концевых частей лавы могут превышать 3 МПа. Если контакт пород является слабым, то может происходить проскальзывание пород по контакту [20]. Проскальзывание пород по

шероховатому контакту ведет к его частичному расслоению, т. е. к сдвигению и раскрытию берегов контакта на величину шероховатости, следствием чего должно быть увеличение проницаемости контакта.

В ходе расчетов установлено, что по мере увеличения пролета лавы область возможного нарушения и расслоения контакта слабых и прочных пород также увеличивается, в частности при пролете лавы 20 м возможная протяженность нарушенного контакта может составлять 14 м, а при пролетах 25 и 30 м — 19 и 25 м соответственно. В этой связи оценивалось влияние возможного расслоения контакта слоев в почве лавы на геомеханическую и гидрогеологическую обстановку вблизи лавы. В задаче расчета НДС расслоение моделировалось предельно тонким разрезом, на берегах которого нормальные и касательные напряжения принимались равными нулю.

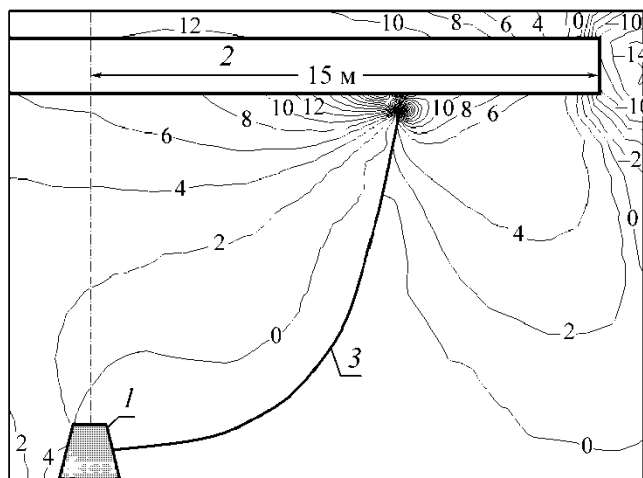


Рис. 6. Изолинии главного напряжения  $\sigma_3$  (МПа) и сглаженная траектория развития трещины гидроразрыва при пролете лавы 30 м: 1 — затопленная выработка; 2 — лава; 3 — трещина гидроразрыва

Расчеты показали, что в рассматриваемом примере расслоение контакта слабо влияет на траекторию развития трещины гидроразрыва, пока трещина гидроразрыва не достигнет области контакта. Однако контакт пород может влиять на развитие трещины гидроразрыва [16], поэтому, если трещина гидроразрыва достигает контакта пород, то ситуация может кардинально измениться. Вода под давлением может проникнуть в частично расслоившийся контакт и, как показал расчет, должна раскрыть его на величину пролета лавы. Таким образом, трещина гидроразрыва может резко изменить свою длину и конфигурацию (рис. 7а). При этом в породном слое, разделяющем заполненный водой контакт и почву лавы, должно сформироваться неоднородное напряженное состояние, характерное для сильного изгиба слоя. На рис. 7а показано распределение главного напряжения  $\sigma_3$  в рассматриваемой области при пролете лавы 30 м.

Видно, что в центральной верхней части и в концевой нижней части слоя формируются области сильного растяжения породы. Напряжение растяжения в этих областях превышает 40 МПа, поэтому здесь возможно зарождение трещин разрыва. Проведен расчет напряженного состояния слоя с двумя трещинами, сформировавшимися в областях растяжения породы (рис. 7б). Трещина 4 в верхней части слоя, начинающая из лавы, является “сухой”, а нижняя трещина 5 — ветвь магистральной трещины гидроразрыва. Очевидно, что прорастание любой из этих трещин через слой слабых пород следует интерпретировать как макроразрушение слоя и прорыв воды в лаву.

Согласно нашей оценке, обе трещины должны расти неустойчиво, при этом “сухая” трещина, на рост которой не влияет условие проникновения воды в трещину, должна иметь опережающее развитие.

Рассмотрим задачи, в которых оси симметрии лавы и затопленной выработки не совпадают (рис. 5, сечение  $A_2$ ), в частности центр затопленной выработки смещен на 7.5 м относительно центра лавы. Как показывают расчеты, ситуация в трещинообразовании не изменяется до тех пор, пока пролет лавы не увеличивается до 20 м. При этом пролете трещина гидроразрыва, существовавшая в кровле затопленной выработки до начала очистных работ, возобновляет развитие и начинает расти под углом примерно  $40^\circ$  к горизонтальной оси, а затем, все больше склоняясь к вертикальной оси, прорастает в угловую часть лавы (рис. 8).

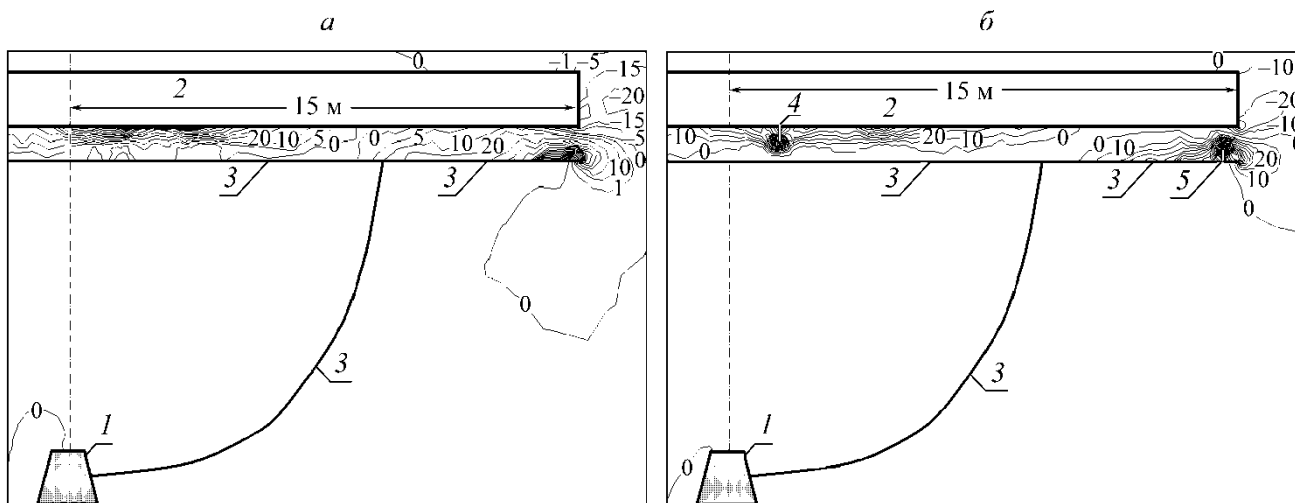


Рис. 7. Изолинии главного напряжения  $\sigma_3$  (МПа) и трещина гидроразрыва при нарушении контакта слабых и прочных пород в почве лавы в случае соосного расположения затопленной выработки и лавы (а); изолинии главного напряжения  $\sigma_3$  (МПа) в слое слабых пород почвы лавы при развитии двух трещин (б): 1 — затопленная выработка; 2 — лава; 3 — трещина гидроразрыва; 4 — “сухая” трещина разрыва пород; 5 — ветвь трещины гидроразрыва

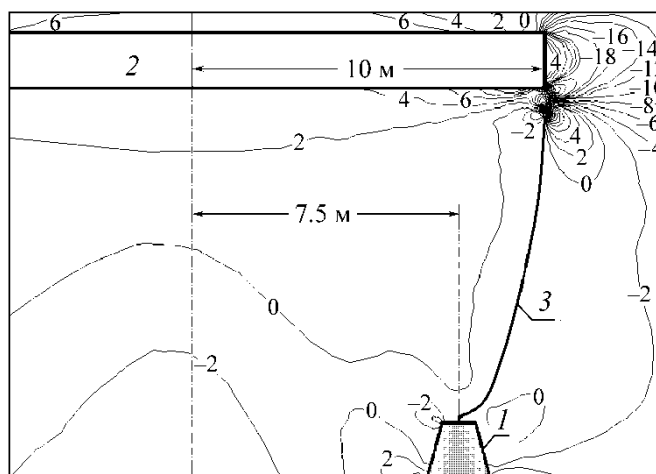


Рис. 8. Изолинии главного напряжения  $\sigma_3$  (МПа) и сглаженная траектория трещины гидроразрыва в случае, когда центры затопленной выработки и лавы смещены на 7.5 м: 1 — затопленная выработка; 2 — лава; 3 — трещина гидроразрыва

Если техногенное расслоение контакта пород в почве лавы не происходит, то при дальнейшем увеличении пролета лавы (до 25 м) трещина гидроразрыва непосредственно прорастает в лаву.

При наличии расслоения пород по контакту вода может проникать в расслоение, что должно привести к формированию зон растяжения в породном слое. В этом случае геомеханическая ситуация в слое близка к той, что показана на рис. 7а. Как и в предыдущей задаче, вероятно развитие одной или двух трещин в слое (см. рис. 7б), следствием чего может быть разрушение слоя слабой породы и прорыв воды в лаву.

Из рассмотренных задач можно заключить, что ситуации с развитием трещины гидроразрыва при разном взаимном расположении лавы и затопленной выработки, т. е. для различных сечений типа  $A_1$ ,  $A_2$ , качественно похожи. В каждом случае трещина растет в сторону лавы, при этом большую роль играет возможное расслоение по контакту подстилающих лаву пород. Различие проявляется лишь в отношении геометрии трещины и величины пролета, при котором трещина гидроразрыва приходит в почву лавы.

Можно сделать вывод, что в случае расслоения контакта область заполнения его водой будет иметь большую протяженность по ширине лавы и, главное, по простиранию пласта. Таким образом, при создании выработанного пространства с пролетом около 25 м в почве лавы, вследствие расслоения контакта подстилающих пород, мог сформироваться огромный скрытый внутренний резервуар воды под давлением. Образование его стало причиной разрушения и почти мгновенного выноса большого объема воды в лаву.

Результаты проведенных расчетов и выводы согласуются с натурными данными о моделируемом прорыве воды в лаву как в отношении сильной деформации почвы лавы, пучения пород, образования трещины в почве лавы, так и в отношении особенностей прорыва воды (механическое разрушение большого объема пород и большой объем практически мгновенно появившейся воды).

Вместе с тем, как можно заключить из расчетов, если бы расслоение пород по контакту сланца и песчаника не произошло по причине высокой прочности контакта, то прорыв воды в лаву все равно произошел бы, но поступление воды было бы менее интенсивным и определялось только условием течения воды по трещине. Таким образом, решающую роль в динамическом разрушении почвы лавы сыграло природное геологическое нарушение. Следовательно, в процессе моделирования развития трещин гидроразрыва необходимо рассматривать различные сценарии, в том числе с влиянием природных геологических нарушений.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моделирование прорыва воды в выработки проведено при многих упрощающих обстоятельствах в отношении геометрии выработок, свойств пород и других горно-геологических условий. Однако результаты исследований, полученные здесь, а также при рассмотрении других примеров из практики, достаточно “устойчивы” при варьировании параметров задачи, поэтому могут объективно отражать некоторые особенности взаимодействия техногенных геопроцессов.

Часть прорывов воды в горные выработки как в виде внезапных потоков с обрушением пород, так и в виде относительно спокойного истечения воды по трещине можно объяснить в рамках модели самопроизвольного гидроразрыва пород. При техногенном перераспределении напряжений в массиве пород возможны ситуации, когда одно из главных напряжений становится меньше гидростатического давления подземной воды. В этом случае происходит развитие трещины гидроразрыва пород в той области массива, где это условие выполняется. Трещина гидроразрыва, в свою очередь, изменяет напряженное состояние массива, тогда реальная геомеханическая ситуация в массиве с трещиной гидроразрыва определяется нелинейным взаимодействием двух процессов — техногенного перераспределения напряжений и действия гидро-

статического давления воды на массив пород. Заранее трудно “угадать” траекторию развития трещины, так как трещина изменяет напряженное состояние массива, при этом она сама растет в изменяющемся поле напряжений.

Возможность развития трещины гидроразрыва определяется двумя условиями: локальным (растягивающее напряжение вблизи кончика трещины должно превышать критическое значение) и интегральным (трещина должна быть раскрыта по всей длине). Последнее условие связано с проникновением воды в трещину и поддержанием определенного гидростатического давления воды в трещине.

Одно из условий развития трещин гидроразрыва является геодинамическим и связано с природными горизонтальными напряжениями в массиве пород. В частности, условие, отвечающее гипотезе А. Н. Динника, благоприятно для образования трещин самопроизвольного гидроразрыва. В условиях высокого природного горизонтального сжатия пород (при прочих равных условиях) развитие трещин самопроизвольного гидроразрыва маловероятно.

В случае самопроизвольного гидроразрыва пород, обусловленного влиянием затопленной выработки, траектория развития трещины не всегда является прямой линией между затопленной и рабочей выработками, а может иметь весьма причудливую форму. Она зависит от особенностей природного поля напряжений и в значительной мере от процесса техногенного перераспределения напряжений, на который влияют геометрия выработанного пространства, его крепление и многие другие технологические факторы.

Одна из наиболее опасных ситуаций в подготовке внезапных динамических прорывов воды в выработки связана с образованием скрытых резервуаров воды вблизи обнажений горных пород. Скрытое образование этих резервуаров может быть следствием как техногенного изменения природных геологических объектов (второй рассмотренный пример с расслоением контакта пород), так и особой геометрии трещины гидроразрыва, растущей вдоль обнажения пород (первый пример). Чем больше скрытый резервуар воды, тем масштабней может быть разрушение слоя пород, разделяющего этот резервуар от рабочей выработки, и, следовательно, тем опасней последствия прорыва воды из резервуара в выработку. Динамика прорыва воды обусловлена механической неустойчивостью процесса разрушения массива при неизменном давлении воды.

В отношении геомеханического контроля и прогноза прорывов воды в горные выработки следует отметить, что многие опасные прорывы из образовавшихся скрытых резервуаров связаны с развитием аномальных смещений пород (пример с пучением почвы лавы). Этот фактор можно учесть при разработке маркшейдерских мер контроля за поведением массива горных пород. Эффективным средством управления и предотвращения опасных ситуаций, вызванных прорывами воды, может быть управление техногенным напряженным состоянием массива, например путем изменения порядка проведения выработок. Этот фактор может быть детально исследован традиционными методами прогноза НДС массива при развитии горных работ.

## **ВЫВОДЫ**

Некоторые прорывы подземной воды в горные выработки могут быть интерпретированы как самопроизвольный гидроразрыв массива горных пород в области техногенного снижения напряжений массива. Наиболее опасные прорывы воды с динамическим разрушением массива и большим объемом внезапно появившейся воды могут быть следствием образования на стадии подготовки прорыва скрытого резервуара воды вблизи обнажения пород и неустойчивостью процесса разрушения массива пород под воздействием воды.

Определяющую роль в возможности развития самопроизвольного гидроразрыва пород вблизи затопленной выработки играют особенности природного и техногенного поля напряжений, гидростатическое давление воды в затопленной выработке, а также порядок проведения выработок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Инструкция** по безопасному ведению горных работ у затопленных выработок / Составители-разработчики А. И. Субботин, В. В. Грицков, М. Г. Козаченко, О. А. Коняхина // Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль: Сб. документов. — Вып. 8. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010.
2. **Внезапный прорыв** вод и плывунов / М. С. Газизов, В. И. Костенко // Горн. энцикл. Т. 1. — М.: Сов. энцикл., 1984.
3. **Мироненко В. А., Мольский Е. В., Румынин В. Г.** Горнопромышленная гидрогеология. — М.: Недра, 1989.
4. **Файф У., Прайс Н., Томпсон А.** Флюиды в земной коре. — М.: Мир, 1981.
5. **Зверев В. П.** Подземная гидросфера. Проблемы фундаментальной гидрогеологии. — М.: Научный мир, 2011.
6. **Желтов Ю. П., Христианович С. А.** О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Изв. АН СССР, ОНТ. — 155. — № 5.
7. **Haimson В.С., Fairhurst С.** Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks, Soc. Petrol. Eng. J., 1967, Vol. 7.
8. **Экономидес М., Олини Р., Валько П.** Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта: от теории к практике. — М.: Институт компьютерных исследований, 2007.
9. **Трубецкой К. Н., Иофис М. А., Милетенко И. В., Милетенко Н. А., Одинцев В. Н.** Проблемы комплексного гидрогеологического и геомеханического техногенного воздействия на геосреду // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Т. 1. — Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2012.
10. **Одинцев В. Н., Милетенко И. В., Милетенко Н. А.** Геомеханическая оценка изменения гидрогеологических условий налегающих пород при скважинной гидродобыче железных руд // Маркшейдерия и недропользование. — 2010. — № 5.
11. **Линьков А. М.** Аналитическое решение задачи о гидроразрыве для неньютоновской жидкости // ФТПРПИ. — 2013. — № 1.
12. **Зубков В. В., Кошелев В. Ф., Линьков А. М.** Численное моделирование инициирования и роста трещин гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2007. — № 1.
13. **Мартынюк П. А.** Особенности развития трещин гидроразрыва в поле сжатия // ФТПРПИ. — 2008. — № 6.
14. **Алексеева Т. Е., Мартынюк П. А.** Траектории выхода трещин на свободную поверхность // ФТПРПИ. — 1991. — № 2.
15. **Алексеев О. П., Вайсман А. М.** Некоторые особенности плоской задачи гидроразрыва упругой среды // ФТПРПИ. — 1999. — № 3.
16. **Мартынюк П. А., Шер Е. Н.** Развитие трещины гидроразрыва в сжатом блочном массиве // ФТПРПИ. — 2010. — № 5.
17. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974.
18. **Морозов Е. М., Никишков Г. П.** Метод конечных элементов в механике разрушения. — М.: Книжный дом “Либроком”, 2010.
19. **Булычев Н. С.** Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1989.
20. **Петухов И. М., Линьков А. М., Сидоров В. С., Фельдман И. А.** Теория защитных пластов. — М.: Недра, 1976.

*Поступила в редакцию 1/II 2015*