

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А. Е., Селяков В. И. Изменение проводимости неоднородной среды при пропускании через нее электрического тока // ДАН СССР.— 1990.— Т. 310, № 1.
2. Селяков В. И. Изменение проницаемости среды при пропускании через нее электрического тока // Тез. докл. на VI Всесоюз. съезде по теорет. и прикл. механике, Ташкент, 1986.
3. Селяков В. И. Изменение проводимости неоднородной среды, связанное с пропусканием через нее электрического тока // Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости.— Новосибирск, 1987.
4. Селяков В. И. Рост трещины в пористой насыщенной среде при пропускании через нее импульса тока // ПМТФ.— 1984.— № 4.
5. Абдульманов И. Г., Глушко С. П., Кадет В. В., Селяков В. И. Электропорометрический метод восстановления функции распределения капилляров по радиусам // ПМТФ.— 1988.— № 4.
6. Абдульманов И. Г., Ермаков В. И., Ростовский Н. С. и др. Перестройка структуры пустотного пространства среды при пропускании через нее электрического тока // ПМТФ.— 1990.— № 3.

г. Москва

Поступила 21/XII 1989 г.,  
в окончательном варианте — 30/X 1990 г.

УДК 624 : 131.5 : 539.4.01

Ю. И. Войтенко, А. В. Михалюк, А. В. Токарчук

### ИМПУЛЬСНЫЙ ГИДРОРАЗРЫВ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Проблема импульсного гидроразрыва твердых тел в последние годы приобретает большое практическое значение преимущественно в горном деле, где этот метод разрушения используется для направленного изменения проницаемости горных пород с целью интенсификации геотехнологических процессов. К настоящему времени проведены некоторые теоретические [1—3] и экспериментальные [4] исследования, позволяющие дать прогноз условий возникновения трещин заданной пространственной конфигурации и их размеров без учета пористости — одного из характерных свойств естественных и искусственных геоматериалов. Кроме того, ранее мало внимания уделялось влиянию на скорость и размеры трещины прочностных свойств пород (вязкости разрушения).

Ниже изложены результаты экспериментального изучения влияния пористости и прочности твердого тела на развитие трещин в режиме импульсного гидроразрыва.

В качестве материала, моделирующего пористую среду типа серо-содержащего известняка, был принят искусственный камень, который изготавливался из песчано-цементной смеси (скелет) и дробленой канифоли (малопрочный компонент-наполнитель) с размером зерна не более 7 мм, содержание  $c_k$  которой составляло 10, 30 и 50 % в диапазоне содержания элементарной серы в известняках месторождений западных районов УССР. Образцы из такой смеси выдерживали при комнатной температуре в течение 28 сут и более для достижения требуемой прочности, определявшейся по испытаниям на одноосное сжатие и составлявшей 20 ... 90 МПа. Пористость модели варьировалась в пределах от 4 до 8 %. Такие физико-механические свойства образцов характерны для многих естественных и искусственных геоматериалов.

В настоящей работе применяли методику проведения экспериментов, подробно описанную в [4]. Так же как и в [4], для импульсного разрыва моделей использовали два типа рабочих жидкостей, коэффициенты кинематической вязкости которых составляли  $2,2 \cdot 10^{-6}$  и  $6,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. Амплитудно-временные режимы импульсного давления, генерировавшегося в жидкости, выбирали из условия применимости результатов наблюдений к прогнозу работы существующей скважинной аппаратуры и технологии импульсного разрыва: давление в рабочей жидкости до 20—30 МПа, скорость нарастания давления  $10^9 \dots 10^{10}$  Па/с, время действия импульса 20 ... 30 мс. Соотношение между размерами образцов и условиями нагружения выбирали таким образом, чтобы развивающаяся трещина не выходила на свободную поверхность образца. Размеры трещин определяли непосредственным измерением после распила образцов пер-

пендикулярно плоскости трещины по следу проникания подкрашенной жидкости разрыва.

Планирование экспериментов проводили в соответствии с требованиями математической статистики с доверительной вероятностью 0,9. Количество параллельных экспериментов в идентичных условиях было принято равным не менее 5, результаты которых усреднялись. Общее количество экспериментов 180. Их анализ позволил установить следующее.

При импульсном гидроразрыве пористых сред, как и при разрыве такого гомогенного материала, как полиметилметакрилат [4], пространственная ориентация образующейся трещины зависит от наличия концентраторов напряжения и симметрии нагружения, которая определяется соотношением между высотой необсаженного интервала  $h$  в зоне разрыва и диаметром скважины  $d_c$ . При  $h \geq (2 \dots 3)d_c$  разрушение породы сопровождается образованием вертикальных трещин, при  $h \leq (1 \dots 2)d_c$  — радиально-кольцевых, которые зарождаются, как правило, у границы обсадки (рис. 1).

Количество трещин, возникающих при импульсном разрыве как пористых, так и сплошных геоматериалов, зависит от скорости нагружения (скорости нарастания давления в зоне разрыва)  $p$ : при  $p \leq 10^{10}$  Па/с, как правило, образуется одна трещина, при  $p > 10^{10}$  Па/с количество трещин возрастает.

Характерной особенностью импульсного гидроразрыва пористых сред, обладающих отличной от нуля фильтрационной проницаемостью, является то, что одновременно с образованием магистральной трещины вокруг скважины 1 и трещины 2 (рис. 2) формируется некоторая область инфильтрации 3, в которой поровое пространство частично или полностью заполнено рабочей жидкостью разрыва. Характерный вид областей инфильтрации при разрыве породы маловязкой жидкостью показан на рис. 2 для вертикальной (а) и радиально-кольцевой (б) трещин.

В образце с вертикальной трещиной среда содержала 10 % малопрочного компонента ( $c_k = 10$  %). Скорость нагружения  $p$  и длительность нагнетания жидкости  $\tau$  составили  $3,13 \cdot 10^9$  Па/с и 26,9 мс. В образце с радиально-кольцевой трещиной  $c_k = 50$  %,  $p = 4,34 \cdot 10^9$  Па/с,  $\tau = 6,2$  мс.

Эксперименты показывают, что размеры области инфильтрации зависят от вязкости жидкости разрыва и проницаемости среды. С ростом вязкости жидкости область инфильтрации уменьшается. Так, при использовании жидкости с вязкостью  $\nu = 6,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с инфильтрация через стенки скважины распространяется на расстояние  $(1,1 \dots 1,2)d_c$ , в то время как при применении жидкости с  $\nu = 2,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с эта область возрастает до  $(2 \dots 2,5)d_c$ .

Ширина фильтрационного клина 4 (рис. 2), т. е. той части области инфильтрации, которая формируется в окрестностях трещины, максимальна у стенки скважины и достигает  $(0,5 \dots 1,2)d_c$ . С удалением от оси скважины она вначале монотонно уменьшается, а с расстояния  $(2,5 \dots 3,5)d_c$  становится примерно постоянной и равной  $(0,15 \dots 0,25)d_c$  при разрыве маловязкой жидкостью и  $(0,05 \dots 0,1)d_c$  при разрыве жидкостью большой вязкости. Увеличение содержания малопрочной минеральной фазы в породе приводит к снижению абсолютных размеров фильтрационного клина.

Так же как и при разрушении гомогенных сред [4], силовые и кинематические параметры процесса импульсного разрыва сильно зависят от вязкости рабочей жидкости, что наглядно иллюстрируется результатами экспериментов, приведенными на рис. 3—6.

На рис. 3 показаны зависимости порогового давления разрыва среды  $p_c$  вертикальной трещиной от содержания малопрочного компонента, в значительной мере характеризующего прочность среды. При построении графиков во внимание принимались лишь эксперименты с одинако-

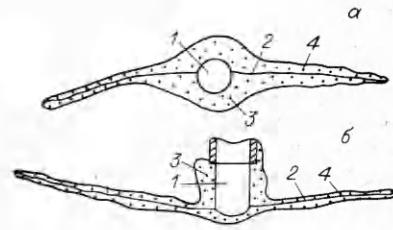
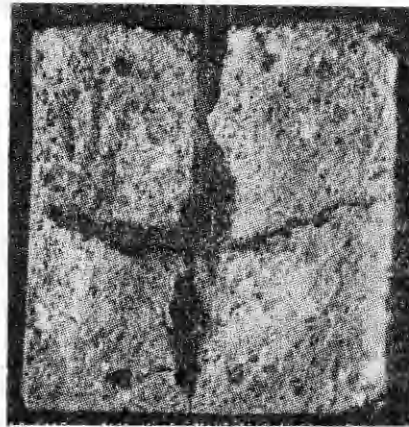


Рис. 2

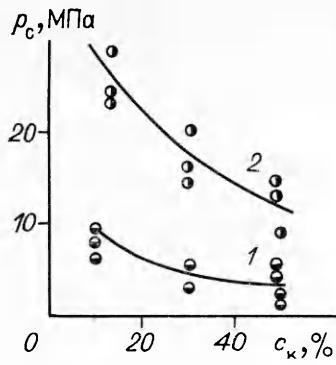
Рис. 1

вой скоростью нарастания давления в импульсе ( $p = 5 \cdot 10^9$  Па/с). Кривые 1, 2 построены для жидкости с  $\nu = 2,2 \cdot 10^{-6}$ ,  $6,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. Сравнивая приведенные кривые, легко заметить, что с увеличением вязкости рабочей жидкости в 310 раз пороговое давление разрыва сред с различными физикомеханическими характеристиками возрастает в 2 ... 3 раза. В качественном отношении этот вывод согласуется с результатами теоретических и экспериментальных исследований стационарного гидроразрыва горных пород [5]. Это имеет большое практическое значение с точки зрения выбора рабочей жидкости разрыва, обеспечивающей наименьшую энергоемкость процесса разрушения (если на этот выбор не оказывает влияния требование обеспечить заданные размеры трещин — длину и ширину (раскрытие), также зависящие от вязкости жидкости).

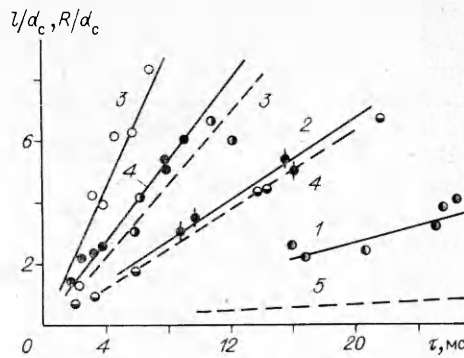
Сравним полученные результаты для пористой среды с опубликованными в [4] данными по разрыву сплошного материала. Прочность полиметилметакрилата на сжатие и разрыв составляет соответственно 100 ... 130 и 60 ... 70 МПа. Такую прочность на сжатие показывают образцы пористой среды при содержании малопрочного компонента 8 ... 10 %. Однако их прочность на разрыв значительно меньше, чем у полиметилметакрилата (всего 10 ... 12 МПа), что характерно для минеральных сред. Поскольку зарождение трещины в значительной мере определяется прочностью среды на разрыв, можно было бы предположить, что пороговое давление разрыва минеральной среды, использовавшейся в экспериментах, должно быть значительно меньше, чем у полимерной среды, изучавшейся в [4]. Однако в действительности пороговые давления обеих сред оказались сравнимыми. Это, по-видимому, объясняется тем, что область инфильтрации в пористой среде образуется раньше, чем возникает трещина, а повышение порового давления, согласно принципу эффективных напряжений, приводит к увеличению прочности среды на разрыв и возрастанию порогового давления разрыва.

На рис. 3 видно, что с повышением процентного содержания малопрочной минеральной фазы породы происходит снижение порогового давления разрыва. Этот результат естествен, поскольку с ростом  $c_k$  уменьшается прочность породы на разрыв.

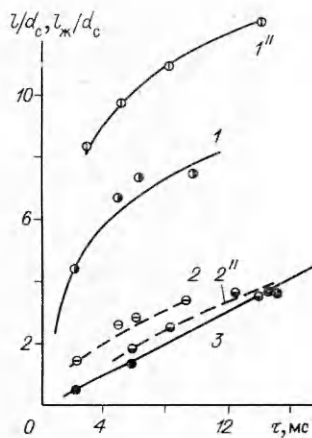
На рис. 4 кривые 1—3 построены для импульсного разрыва маловязкой жидкостью пористой среды с содержанием малопрочного компонента соответственно 10, 30 и 50 % при амплитудах давления 8,1 ... 9,8; 3,6 ... 5,3 и 1,8 ... 5,1 МПа, кривые 4 — для разрыва полиметилметакрилата, сплошные линии отражают зависимости  $l(\tau)$ , штриховые —  $R(\tau)$ . Для сравнения с импульсной технологией разрушения кривая 5 отражает зависимость радиуса радиально-кольцевой трещины от времени нагнетания маловязкой жидкости при статическом гидроразрыве песчаника в кровле угольного пласта с пределом прочности на разрыв 12—15 МПа и поверхностной энергией разрушения  $\gamma = 39,5$  Дж/м<sup>2</sup> [6].



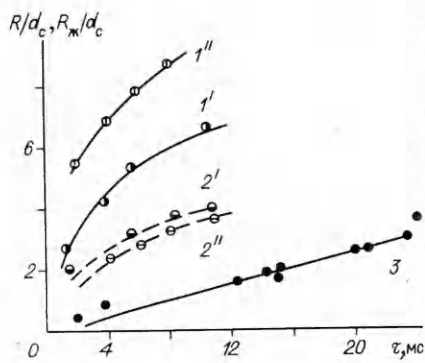
Р и с. 3



Р и с. 4



Р и с. 5



Р и с. 6

На рис. 5 и 6 показано влияние времени инъектирования вязкой ( $\nu = 6,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ) жидкости на зону разрыва  $l$ ,  $R$  (сплошные линии) и глубину проникания флюида  $l_{\text{ж}}$ ,  $R_{\text{ж}}$  (штриховые) для вертикальных и радиально-кольцевых трещин соответственно (кривые 1 и 2 — среды с  $c_{\text{к}} = 10\%$  при давлениях разрыва 23,5 ... 29,0 МПа, 1' и 2' — с  $c_{\text{к}} = 30\%$  и амплитудой нагружения 15,0 ... 20,0 МПа, 1'' и 2'' — с  $c_{\text{к}} = 50\%$  при давлениях 9,5 ... 13,5 МПа). Для сравнения кривыми 3 на рис. 5 и 6 иллюстрируется образование трещин разрыва в полиметилметакрилате.

Из рис. 4 видно, что при разрыве модельной среды маловязкой жидкостью глубина распространения трещин практически линейно возрастает пропорционально времени действия давления  $\tau$ . Аналогичная зависимость наблюдается и при разрыве полиметилметакрилата. При использовании жидкостей с большой вязкостью зависимости  $l(\tau)$  и  $R(\tau)$  носят ярко выраженный нелинейный характер (рис. 5 и 6) и имеют два характерных участка, отличающихся скоростью развития трещины. На первом из них в области малых времен нагнетания скачок трещины при разрыве вязкой жидкостью существенно больше, чем при разрыве маловязкой за счет большего запаса энергии, накопленной в образце к моменту предельного равновесия, и большего раскрытия трещины на начальной стадии ее движения (эффект клина). На втором (более пологом) участке при больших временах нагнетания флюида ( $\tau > 8-10$  мс) рост размеров трещин происходит значительно медленнее из-за вязкого сопротивления течению жидкости в трещине. Этой особенностью разрушение вязкой жидкостью пористых материалов существенно отличается от разрушения однородных материалов (например, полиметилметакрилата [4]).

Из рис. 5 и 6 видно, что при разрыве пористой среды, так же как и при разрушении сплошной [4], имеет место отставание фронта жидкости в трещине от ее вершины («носика»), однако в пористой среде оно более значительно и увеличивается с уменьшением прочностных ее характеристик.

В заключение отметим, что снижение вязкости рабочей жидкости, увеличение фильтрационной проницаемости пористой среды и ее прочности ведут к уменьшению размеров зон разрыва за счет роста фильтрационных потерь и квазихрупкого сопротивления среды разрыву.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михалюк А. В. Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов. — Киев: Наук. думка, 1986.
2. Вовк А. А., Войтенко Ю. И., Михалюк А. В., Белонван А. Ф. Приближенный расчет размеров вертикальных трещин при осесимметричном гидроразрыве пород // Пробл. прочности. — 1985. — № 5.
3. Вовк А. А., Войтенко Ю. И., Михалюк А. В., Белонван А. Ф. Оценка необратимых размеров радиально-кольцевых трещин при гидроразрыве пород // Пробл. прочности. — 1985. — № 6.
4. Вовк А. А., Войтенко Ю. И., Михалюк А. В. Импульсный разрыв полиметилметакрилата // ПМТФ. — 1986. — № 5.
5. Христианович С. А., Желтов Ю. П. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Механика сплошной среды. — М.: Наука, 1981.
6. Чернов О. И., Фролов Г. А., Красников С. Я., Шепелев Л. Н. Результаты экспериментов по гидродинамической стратификации монолитного породного массива с целью его разупрочнения // ФТПРПИ. — 1985. — № 6.

г. Киев

Поступила 13/III 1990 г.,  
в окончательном варианте — 19/IX 1990 г.

УДК 620.178.7

А. Г. Иванов, В. А. Огородников

### РАЗЛИЧАЮТСЯ ЛИ ХРУПКИЕ И ПЛАСТИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПРИ ОТКОЛЕ?

Рассмотрено энергетическое описание откола для хрупких и пластичных материалов. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие правомерность использования для них одних и тех же соотношений.

Успехи механики разрушения показали плодотворность энергетического подхода в описании хрупких разрушений. Однако ввиду специфики разрушения материала при отколе прямое использование механики разрушения затруднено. Поэтому в [1] сделана попытка применить баланс упругой энергии деформации и работы по отрыву материала в качестве необходимого условия разрушения без наложения каких-либо ограничений на сам механизм разрушения.

Это необходимое условие записано в форме

$$(1) \quad \int_0^{\delta} \frac{\sigma^2 dx}{AE} \geq \lambda,$$

где  $\sigma$  — напряжение растяжения;  $x$  — координата, отсчитанная от свободной границы материала;  $E$  — модуль Юнга;  $\lambda$  — удельная на единицу поверхности работа отрыва материала;  $A$  — функция коэффициента Пуассона  $\nu$ , равная  $2(1 - \nu)[(1 + \nu)(1 - 2\nu)]^{-1}$ .

Из уравнения (1) следует, что напряжение разрушения  $\sigma_p$  и толщина отколовшегося слоя материала  $\delta$  связаны неравенством

$$(2) \quad \sigma_p^2 \delta \geq \alpha \lambda E A.$$

Здесь коэффициент  $\alpha$  лежит в интервале от 1 до 3 в зависимости от формы падающего импульса давления. Так, треугольному импульсу соответ-