

расстояние между центрами армирующих волокон. Для описанного образца $\eta = 23$, т. е. теоретическая величина зоны проникновения краевого эффекта равна 6,24 см, что на 8% меньше полученной экспериментально для растянутой зоны и на 4% для сжатой.

Итак, оценка глубины проникновения краевого эффекта по постоянной затухания снижает требования к точности определения перемещений, величина зоны краевого эффекта, полученная таким методом, мало отличается от величины, получаемой другими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демешкин А. Г., Корнев В. М. О длине образцов из однонаправленного композита с учетом структуры и анизотропии. — *Механика композит. материалов*, 1981, № 2.
2. Гарнопольский Ю. М., Розе А. В. Оценка зоны влияния краевого эффекта в однонаправленных композитах. — *Механика полимеров*, 1965, № 5.
3. Бакулин В. Н., Инякин В. Н. и др. Исследование краевого эффекта в пластинках с накладками. — *Механика композит. материалов*, 1985, № 1.
4. Баев Л. В., Горев Б. В. и др. Способ испытания однонаправленных композитов. — *БИ*, 1981, № 2.
5. Жилкин В. А., Зиновьев В. Б., Горбунова Т. В. Исследование анизотропных задач механики деформируемых тел методом голографического муара. — *Механика композит. материалов*, 1983, № 2.

Поступила 9/VII 1985 г.

УДК 624.131 + 539:215

ИМПУЛЬСНЫЙ ГИДРОРАЗРЫВ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

А. А. Вовк, Ю. И. Войтенко, А. В. Милалюк

(Киев)

Использование импульсного гидроразрыва для интенсификации геотехнологических процессов в ряде отраслей горного дела связано с инженерной оценкой параметров возникающих при этом трещин (протяженность, раскрытие, количество, ориентация) особенно, если технологией работ требуется целенаправленное разрушение массива трещинами определенных размеров и конфигурации. Наиболее распространенная схема импульсного гидроразрыва состоит в возбуждении импульсного давления в некоторой части скважины, заполненной жидкостью. Если это давление достаточно велико, прискважинная область породного массива разрушается с образованием трещин вертикальной и радиально-кольцевой конфигурации. Поскольку энергия импульса и масса жидкости в зоне разрыва ограничены, трещины распространяются на конечное расстояние и имеют конечное раскрытие, определяющее новые гидродинамические свойства массива. Несмотря на наличие значительного арсенала специальной геофизической аппаратуры, позволяющей проводить подобные работы, механике импульсного гидроразрыва внимание практически не уделялось. В то же время для прогноза эффективности и выбора оптимального режима импульсного гидроразрыва необходимо выяснить общие закономерности разрушения массива при таких режимах нагружения. Эта цель преследовалась при проведении описанных ниже экспериментов.

В качестве модели горной породы принят полиметилметакрилат, поскольку его прочность на разрыв превышает диапазон изменения этой характеристики у реальных горных пород. Размеры блоков выбирались так, чтобы обеспечивалась гарантированная остановка трещины внутри блока без ее выхода на свободную поверхность. В блоке 5 сверлили отверстие (скважину) 6 (рис. 1), в которое на клею вставляли обсадную трубку 7, ограничивающую область воздействия жидкости на стенку. В трубке размещался поршень 1, снабженный датчиком давления 8 и имеющий каналы для подачи в рабочую зону жидкости разрыва 2, стравливания воздуха 4 и размещения проводов связи датчика с регистрирующей аппаратурой 3. Донная часть отверстия имела сферическую, коническую или плоскую форму, моделировавшую тип долота, используемого при бурении скважин. Для разрыва использовались три жидкости одинаковой плотности, но существенно отличающиеся вязкостью. Коэффициент кинематической вязкости первой жидкости $2,2 \cdot 10^{-6}$, второй — $6,4 \cdot 10^{-4}$ и третьей — $0,105$ м²/с. Датчик давления представлял собой турмалиновый или пьезокварцевый диск, помещенный в резиновый чехол и металлическую обойму

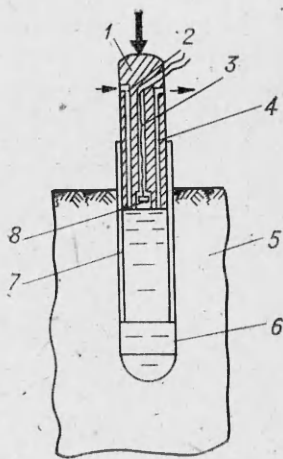


Рис. 1

и залитый эпоксидной смолой. Градуировка датчика осуществлялась при статическом нагружении. В качестве согласующего элемента в цепи регистрации применялся одноканальный усилитель на полевых транзисторах, описанный в [1]. Сигналы регистрировались осциллографом С8-9А. Конструктивные элементы датчика выбирались так, чтобы его частотная характеристика обеспечивала устойчивую регистрацию динамического процесса с допустимой погрешностью. Для этого требовалось соблюдение двух условий [1]:

$$f_{\max} < 0,3f_d, \quad f_{\min} R_y^2 C_3^2 \gg 1,$$

где f_{\max} и f_{\min} — наибольшая и наименьшая частоты измеряемого процесса; f_d — собственная частота датчика; R_y — входное сопротивление усилителя; C_3 — эквивалентная емкость измерительного канала. В экспериментах $f_{\max} \sim 2$ кГц, $f_{\min} \sim 50$ Гц, $f_d = 5 \cdot 10^4$ Гц, $R_y^2 C_3^2 \leq 0,81$ Гц².

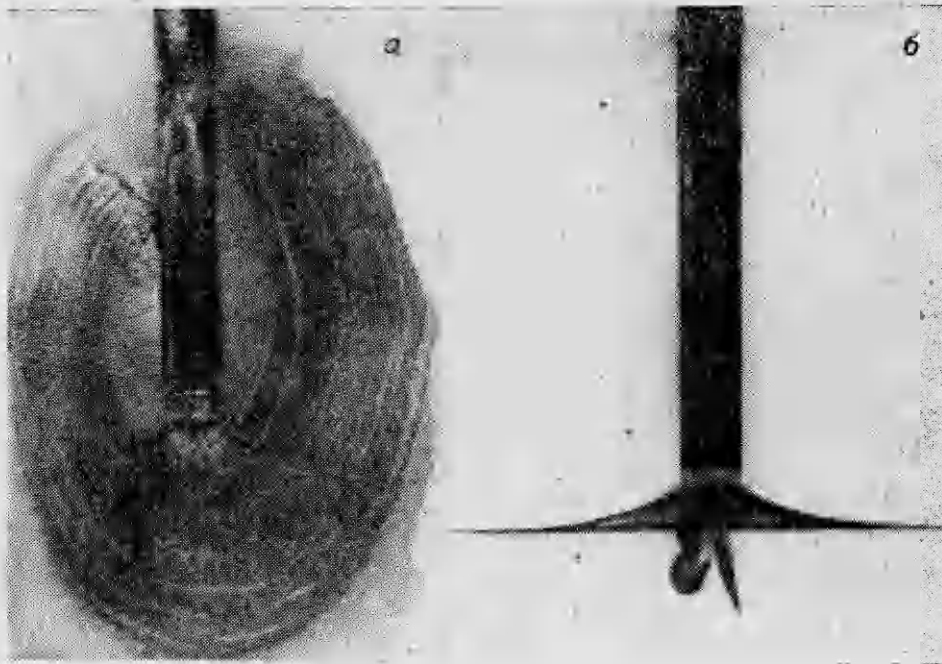
Случайные ошибки измерения процессов, связанные с работой контрольно-измерительной аппаратуры, определялись аналогично [1]. Общая погрешность измерения давления 3,05—16,7% (в зависимости от режима усиления).

Импульсное давление в жидкости возбуждалось ударом по поршню свободно падающего груза массой 50 кг на вертикальном копре 100FU-122. Скорость нарастания давления, изменявшаяся в опытах от $4 \cdot 10^9$ до 10^{11} Па/с, варьировалась путем изменения массы груза, скорости соударения, толщины резиновой прокладки между грузом и поршнем. Такой диапазон изменения скорости нагружения обусловлен возможностями скважинной аппаратуры для импульсного разрыва. Развитие трещин во времени регистрировалось оптическим методом с использованием камеры СКС-1М при частоте съемки 1300—4300 кадр/с, для чего жидкость разрыва окрашивалась в темный цвет. Результаты экспериментов показали следующее.

При импульсном гидроразрыве могут быть получены как вертикальные, так и радиально-кольцевые трещины (рис. 2, а, б). Образование той или иной трещины зависит от соотношения между высотой зоны разрыва h и диаметром скважины d_c . При $h > (1-3)d_c$ при разрыве образуются вертикальные трещины. Если область разрыва меньше, возникают трещины радиально-кольцевой конфигурации. Граничное соотношение между h и d_c зависит от конфигурации донной части скважины. Если она имеет сферическую форму, лишенную видимых концентраторов напряжений, то $h/d_c = 1$. Для донных частей конической формы h/d_c увеличивалось до 1,8—2,0, для прямоугольной — до 2,5—3.

Количество образующихся трещин зависит от скорости импульсного разрыва (скорости нарастания давления) и наличия концентраторов. При скорости нарастания давления менее 10^{10} Па/с обычно образуется одна (для вертикальных — двусторонняя) трещина. С ростом скорости разрыва количество трещин увеличивается. При малых скоростях разрыва количество трещин может быть увеличено созданием искусственных концентраторов напряжений (надразов, царапин и т. п.). Как показано в [2], в промышленных условиях роль таких концентраторов выполняют трещины, образующиеся в результате пулевой или кумулятивной перфорации прискважинных зон.

Радиально-кольцевые трещины, образующиеся при импульсном гидроразрыве, горизонтальны, однако в прискважинной зоне может быть искривление плоскости трещины, вызванное геометрией концентратора. Например, в скважинах с конической или прямоугольной донной частью искривление плоскости трещины происходит в направлении биссекторной



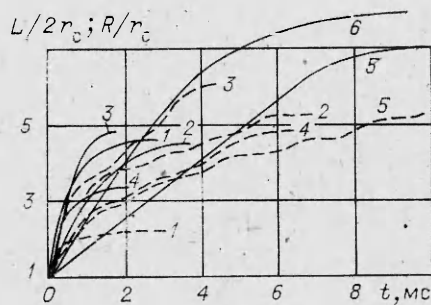
Р и с. 2

плоскости углового концентратора (см. рис. 2, б). Эта переходная область обычно распространяется на расстояние $(1,5-2)r_c$, где $r_c = d_c/2$.

Динамика развития радиально-кольцевых и вертикальных трещин (сплошные и штриховые линии) во времени показана на рис. 3. Условия экспериментов, при которых получены эти кривые, даны в таблице, где v — скорость соударения груза и поршня, p_m — максимальное давление в жидкости, \dot{p} — скорость нарастания давления, \dot{R}_m , \dot{L}_m — максимальные скорости радиально-кольцевой и вертикальной трещин соответственно, t_+ — длительность импульса давления, t_H — время нарастания давления, R , L — радиус и длина трещин в момент остановки, r_c — радиус скважины, ν — коэффициент кинематической вязкости.

Из рис. 3 видно, что на начальной стадии разрыва соотношение между текущей глубиной трещин и временем действия давления имеет линейный характер. Это свидетельствует о постоянстве скорости трещин. Общий характер кривых $R(t)$ и $L(t)$ показывает, что она в то же время максимальна. Следует отметить, что абсолютные значения максимальной скорости роста трещин при импульсном разрыве полиметилметакрилата, достигнутые в опытах, на порядок и больше ниже максимально возможных скоростей, рассчитанных, например, по формуле Д. К. Робертса и А. А. Уэллса, а именно $v_T \approx 0,38 \sqrt{E/\rho} = 590$ м/с, где $E = 2,9 \cdot 10^9$ Па — модуль Юнга полиметилметакрилата, $\rho = 1,18 \cdot 10^3$ кг/м³ — плотность. Это значит, что трещины, образующиеся при импульсном гидроразрыве, самотормозящиеся, т. е. выделяющаяся при их образовании энергия недостаточна для автокаталитического поддержания процесса разрушения, который контролируется интенсивностью и временем действия импульсной нагрузки.

Перед остановкой трещины ее скорость монотонно снижается. Причем



Р и с. 3

Номер кривой	v , м/с	p_m , МПа	$p \cdot 10^{-10}$, Па/с	R_m , м/с	L_m , м/с	t_+ , мс	t_H , мс	R/r_c , м	L/r_c , м	$v \cdot 10^4$, м ² /с
--------------	-----------	-------------	---------------------------	-------------	-------------	------------	------------	-------------	-------------	------------------------------------

Радиально-кольцевые трещины

1	1,25	28	1,35	50	—	4,4	1,4	5,0	—	2,2
2	1,98	39	1,96	21	—	6,5	2,0	5,21	—	640
3	3,13	42	2,35	36	—	3,5	1,5	5,05	—	640
4	4,43	53	3,54	40	—	2,9	1,5	3,47	—	640
5	0,77	24	0,66	3,8	—	31,5	3,6	8,67	—	640
6	1,13	26	0,61	10	—	12,6	4,6	8,77	—	$1,05 \cdot 10^5$

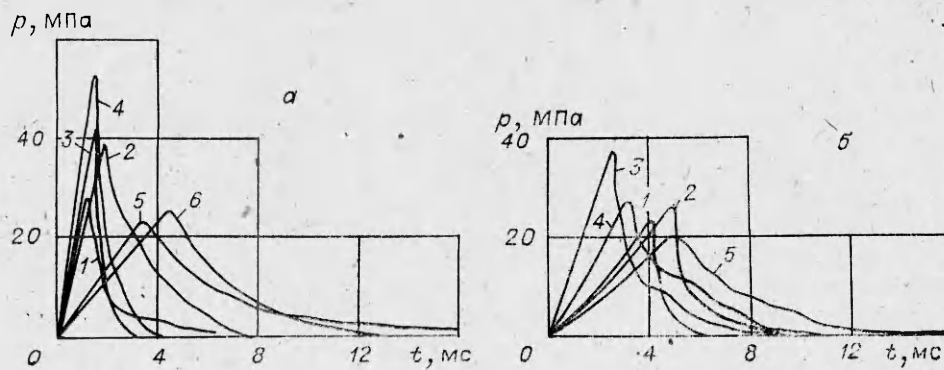
Вертикальные трещины

1	0,78	22	0,45	—	14	6,6	4,1	—	3,77	2,2
2	0,77	26	0,53	—	29	11,9	4,9	—	13,3	2,2
3	1,40	38,5	1,54	—	35	7,0	2,5	—	11,1	2,2
4	0,77	27,5	0,92	—	14	9,0	3,0	—	8,44	640
5	0,77	20,5	0,40	—	12	18,0	5,0	—	11,1	640

чем выше вязкость жидкости, используемой для разрыва, и ниже скорость нарастания давления, тем медленнее происходит торможение трещины, что приводит к общему увеличению длительности процесса импульсного разрыва. На основании проведенных экспериментов установлено, что при увеличении вязкости жидкости разрыва в 300 раз время развития трещины возрастает в 3 раза.

Осциллографические записи изменения давления во времени в зоне разрыва даны на рис. 4 (*a* — радиально-кольцевые трещины, *б* — вертикальные, нумерация кривых на рис. 3 и 4 совпадает). Их сравнение с кинограммами движения трещин показывает, что начало движения трещины совпадает по времени с максимумом давления, т. е. в условиях проведения экспериментов объем развивающейся трещины возрастал быстрее, чем объем вытесненной жидкости из подпоршневого пространства скважины, и образование трещины приводило к разгрузке разрушаемой среды. Можно ожидать, что существуют такие скорости нагружения, при которых объем истечения жидкости из скважины превысит скорость ее поглощения трещиной и начало движения трещины будет приурочено к некоторому критическому давлению, меньшему его амплитудного значения. Остановка трещины наблюдается при внутрискважинных давлениях, составляющих 5—15% того, которое имело место к моменту инициирования трещины, что согласуется с общими представлениями механики разрушения материалов [3].

Из анализа кинограмм развития разрушения видно, что в носике трещины формируется область, свободная от жидкости, т. е. фронт трещины опережает фронт инъецированной жидкости. Величина опережения зависит от вязкости жидкости разрыва. Поскольку скорости фронтов трещин и жидкости практически одинаковы, размеры этой области можно считать



Р и с 4

постоянными, зависящими только от свойств взаимодействующих сред (твердого тела и жидкости).

Характерная особенность движения трещин разрыва — его скачкообразный характер (см. рис. 3), особенно заметный на участках торможения. Эта скачкообразность проявляется в виде периодической смены ускоренного и замедленного развития трещин. Различия в скоростях разрушения на этих участках значительны: если на участке ускоренного развития скорость трещины достигает 40—60 м/с, в ряде случаев превышая величину, характерную для начальной стадии процесса разрыва, то при замедлениях скорость трещин снижалась до 1—2 м/с. Периодичность смены ускорений и торможений достаточно устойчивая. Ее частота, зависящая от скорости нагружения и вязкости жидкости, изменялась от 0,67 до 2 кГц. С ростом скорости нарастания давления разрыва частота смены ускорений и замедлений трещин увеличивается.

Описанная особенность развития трещин разрыва, установленная на основе анализа кинограмм процесса, приводит к появлению на вновь образованных поверхностях разрушения так называемого «речного узора» [3]. Наиболее рельефно этот узор заметен при разрыве с малыми скоростями жидкостью большой вязкости; с увеличением скорости он измельчается и может стать визуально незаметным. Тот факт, что появление «речного узора» связано с периодическим ускорением и замедлением трещин, подтверждается измерениями расстояний между соседними гребнями, которые в точности соответствуют частоте процесса. К сожалению, методика измерений импульсов давления не позволила обнаружить влияние периодической смены скоростей трещины на их амплитудно-временную конфигурацию.

Возможный механизм периодической смены ускорений и замедлений рассмотрим на примере разрыва полиметилметакрилата вертикальной трещиной. Как показывают кинограммы процесса, такое разрушение зарождается чаще всего в виде односторонней трещины, в которую проникает жидкость разрыва со скоростью, определяемой давлением в ней. При расширении берегов трещины под действием нормально приложенного давления вокруг скважины образуется сложное напряженное состояние, вызванное не только внутрискважинным давлением, но и деформацией полиметилметакрилата вследствие появления трещины ненулевого раскрытия. Как показано в [4], в этом случае наибольшие растягивающие напряжения возникают на противоположной (по отношению к ранее зародившейся трещине) образующей скважины. Когда эти напряжения достигают предельных величин, возникает вторая трещина в плоскости, совпадающей с плоскостью первой. В нее, как и в первую, проникает жидкость разрыва, способствуя дальнейшему развитию процесса разрушения.

Поскольку расход жидкости, определяемый скоростью движения поршня, в достаточно короткий промежуток времени можно считать постоянным, появление второй трещины приводит к некоторому снижению внутрискважинного давления и соответствующему торможению трещин. Нарастание давления вследствие продолжающегося перемещения поршня вызывает ускорение роста трещин. Однако быстрый рост трещины приводит к опережающему росту ее объема по отношению к тому, который вытесняется поршнем, и давление в жидкости вновь падает, трещина замедляется, ожидая очередного подпора жидкости разрыва. Если допустить справедливость такого объяснения периодического ускорения и замедления трещин, становится очевидным, что наиболее ярко этот эффект, а так же образование «речного узора» должны проявляться при разрыве вертикальными трещинами и в меньшей степени — радиально-кольцевыми. Это обстоятельство находит подтверждение при сравнении кривых рис. 3, а также в упоминавшемся выше уменьшении периода замедления с ростом скорости нарастания давления в жидкости.

Измерения давления в зоне разрыва и его изменения во времени показали, что его пороговое значение, соответствующее началу развития трещины, сильно зависит от наличия и размеров начальных трещин и дру-

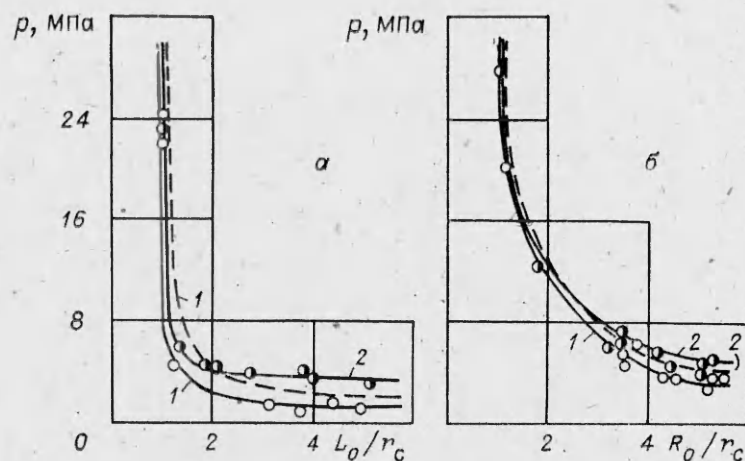


Рис. 5

гих дефектов на внутренней поверхности скважины (отверстия). Практический интерес представляют зависимости уровня порогового давления от размеров начальной трещины, показанные на рис. 5 (*a* — вертикальные трещины, *b* — радиально-кольцевые). Кривые 1 построены по результатам экспериментов с жидкостью, у которой $\nu = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, 2 — $\nu = 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, штриховые линии — теоретические расчеты по рекомендациям работы [5]. Из рис. 5 видно, что при прочих равных условиях для образования радиально-кольцевых трещин необходимо создание давлений в жидкости разрыва, значительно больших, чем для вертикальных трещин. Этот вывод находится в полном согласии с известными из теории упругости [6] особенностями формирования полей напряжений вокруг полости, нагруженной изнутри давлением. Так, при глубине начальной трещины, равной $2r_c$, пороговое давление разрыва полиметилметакрилата вертикальной трещиной в 3—5 раз меньше, чем радиально-кольцевой. Это различие убывает по мере увеличения начальной трещины и при $L_0/r_c = R_0/r_c > 5$ становится несущественным. Поскольку пороговое давление разрыва быстро уменьшается с ростом размеров начальной трещины, ее создание может быть использовано как эффективный метод управления давлением разрыва и характером разрушения, что теоретически обосновано в [2, 5].

Поскольку размеры зоны разрыва зависят от количества инъецированной жидкости, естественно ожидать, что глубина (длина) трещин возрастает с увеличением длительности импульса. Эти зависимости показаны на рис. 6 (сплошные линии для вертикальных трещин, штриховые — для радиально-кольцевых.) Кривые 1 построены для разрыва жидкостью с $\nu = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, 2 — $\nu = 6,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Рис. 6 позволяет сделать два практических вывода. Во-первых, размеры области разрушения линейно увеличиваются с ростом времени действия давления, во-вторых, увеличение вязкости жидкости приводит к резкому уменьшению размеров зон разрыва. В условиях проведения экспериментов увеличение вязкости жидкости в 310 раз привело к сокращению зоны разрыва в 2—3 раза.

Поскольку на практике гидроразрыв используется для интенсификации гидродинамического взаимодействия скважины и окружающей среды, следует уделить внимание оценке раскрытия трещин, которое определяет гидравлическую проводимость трещины. В экспериментах регистрировалось необратимое зияние трещин, определявшееся по остаточной деформации блока полиметилметакрилата. Измерения показали, что максимальное раскрытие трещин наблюдается в стенках скважины и может достигать 0,2—0,3 мм или $(0,022—0,033)r_c$. С расстоянием от скважины раскрытие трещин уменьшается, что зависит от вида трещины. В вертикальных трещинах уменьшение раскрытия на пути от стенки скважины

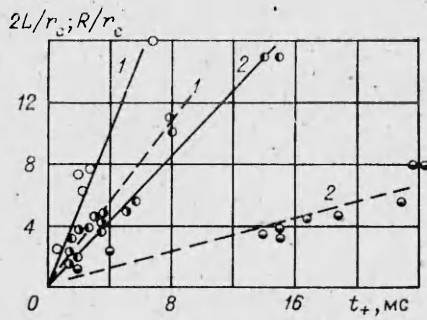


Рис. 6

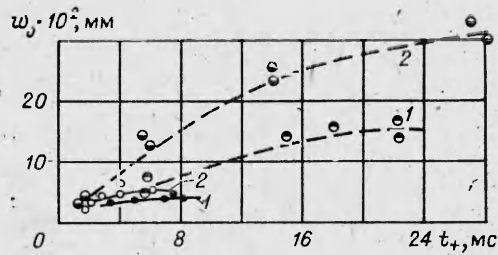


Рис. 7

до границы зоны разрушения сравнительно небольшое и составляет 0,1—0,15 мм. В радиально-кольцевых трещинах сужение трещины в той же области составляет 0,15—0,2 мм. Важно отметить, что вблизи вершины трещины ее раскрытие отлично от нуля. Это позволяет ожидать, что трещины, полученные в результате импульсного разрыва, имеют гидравлическую проводимость во всей области их развития.

Влияние времени действия импульса давления t_+ на раскрытие трещины в стенке скважины w_0 показано на рис. 7, где сплошными линиями даны зависимости $w_0(t_+)$ для вертикальных и штриховыми — для радиально-кольцевых трещин при разрыве жидкостями с $\nu = 2,2 \cdot 10^{-6}$ и $6,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ (кривые 1 и 2). Отсюда можно сделать вывод, имеющий большое значение для технологии импульсного разрыва: увеличение вязкости жидкости разрыва приводит к росту раскрытия трещин.

Следовательно, параметры образующихся при импульсном разрыве трещин в значительной мере зависят от вязкости жидкости. Это позволяет ожидать, что использование подобранных соответствующим образом жидкостей или их смесей может быть эффективным средством управления процессом разрыва. Как показали эксперименты, при использовании для разрыва смеси жидкостей с однородным распределением вязкости по массе процесс распространения трещин развивается по описанным выше законам. Если для разрыва используются несмешивающиеся жидкости, размещающиеся в скважине чередующимися слоями, разрыв полиметилметакрилата начинается в области размещения жидкости с наименьшей вязкостью, которая инъецируется в трещину в первую очередь и определяет скорость ее распространения и размеры. В дальнейшем в развитии процесса принимают участие жидкости в порядке возрастания их вязкости, способствуя увеличению раскрытия трещин разрыва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовк А. А., Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. и др. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок.— Киев: Наук. думка, 1984.
2. Кучерявый Ф. И., Войтенко Ю. И., Михалюк А. В. Управление характером разрушения при гидроразрыве пород.— Изв. вузов. Горн. журн., 1983, № 9.
3. Финкель В. М. Физика разрушения.— М.: Металлургия, 1970.
4. Седов Л. И. Механика сплошной среды.— М.: Наука, 1970, т. 2.
5. Кучерявый Ф. И., Михалюк А. В., Войтенко Ю. И. Управление пороговым давлением при гидроразрыве пород.— Изв. вузов. Горн. журн., 1983, № 4.
6. Безухов Н. М. Основы теории упругости, пластичности и ползучести.— М.: Высш. школа, 1968.

Поступила 17/VI 1985 г.