

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.831:531.781.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБА НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА ГОРНЫХ ПОРОД

**С. В. Сердюков, М. В. Курленя, А. В. Патутин,
Л. А. Рыбалкин, Т. В. Шилова**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032yandex.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Приведены результаты лабораторных исследований направленного гидроразрыва блока орг-стекла. Формирование трещины поперек скважины получено за счет дополнительного касательного нагружения ее стенок в интервале разрыва. Установлено, что основное сейсмическое излучение при гидроразрыве не связано с разрушением материала модели и возникает после образования трещины.

Массив горных пород, скважина, направленный гидроразрыв, поперечная трещина, сейсмическое излучение

Направленный гидроразрыв является одним из существенных элементов скважинных горных технологий и предназначен для управляемого воздействия на породный массив при освоении месторождений твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых. Наибольшее распространение эта технология получила в газодобывающей промышленности для извлечения газа из сланцевых формаций. В подземной добыче твердых полезных ископаемых направленный гидроразрыв применяется для разупрочнения труднообрушаемой кровли угольных пластов [1]. Значительный практический интерес представляет использование этой технологии для интенсификации добычи вязкой нефти, выщелачивания цветных металлов, создания в породном массиве противодиффузионных экранов.

Известные способы получения трещин поперек скважин основаны на щелевых инициаторах, создаваемых струйными или механическими щелеобразователями. Главной проблемой такого подхода является необходимость выполнения дополнительной, энергетически затратной операции по нарезанию ориентированной щели в породе. Чтобы повысить эффективность гидроразрыва в необсаженных скважинах, предложен безщелевой способ, в котором направление энергетически выгодного развития трещины задают без разрушения пород за счет изменения их напряженного состояния [2]. Для этого устройство разрыва закрепляют анкером [3], который под действием давления рабочей жидкости на герметизатор формирует касательное на-

гружение скважины. Это вызывает растяжение пород вдоль ее оси и способствует образованию поперечной трещины. Одна из задач настоящей работы — экспериментальная проверка безщелевого способа направленного гидроразрыва.

Составной частью современных горных технологий является контроль результатов. При мониторинге технологических гидроразрывов наибольшее распространение получил микросейсмический метод, позволяющий контролировать геометрию и ориентацию трещин в породном массиве [4, 5]. В состав задач данной работы включено исследование особенностей сейсмического излучения разрывов, создаваемых в экспериментах. Рассмотрены схемы анкерного крепления герметизатора, методика формирования направленных трещин и полученные результаты.

ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Гидроразрывы осуществляли устройством, общий вид которого показан на рис. 1. Оно состоит из цангового анкера 1, нажимного герметизатора 6, трубки 8, гайки 10, тяги 9 с внутренним каналом 5 и гидравлическим входом 11. Анкер выполнен в двух вариантах: с кольцевой проточкой б, формирующей острый выступ индентора а, и без нее. В первом варианте сцепление анкера со стенкой скважины происходит по линии вдавливания индентора в материал модели с поверхностью контакта в 2–4 раза меньше площади поперечного сечения скважины. Во втором варианте контакт анкера больше этого сечения в 2–4 раза.

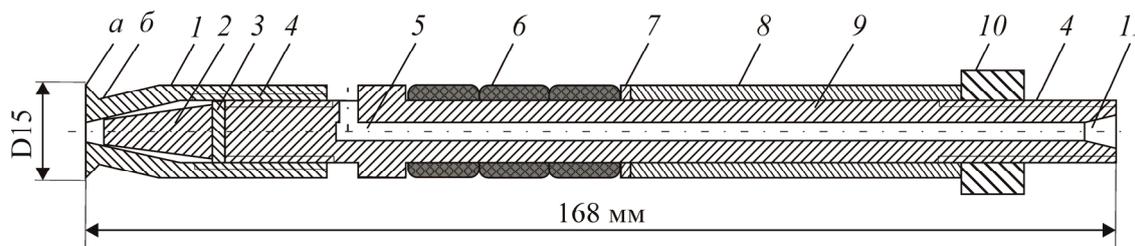


Рис. 1. Общий вид устройства гидроразрыва: 1 — цанговый анкер (с кольцевой проточкой б и индентором а или без них); 2 — конус; 3 — прокладка; 4 — резьбовые соединения; 5 — канал; 6 — герметизатор; 7 — шайба; 8 — трубка; 9 — тяга; 10 — гайка; 11 — гидравлический вход

При проведении экспериментов устройство вставляли в скважину до упора на забой, после чего тягу 9 ввинчивали в анкер 1 и приводили его в рабочее положение. Затем устанавливали герметизатор 6, шайбу 7, трубку 8, гайку 10 и герметизировали интервал разрыва. Вход 11 соединяли рукавом высокого давления с гидравлической станцией. Рабочую жидкость подавали в интервал разрыва между забоем скважины и герметизатором 6 через вход 11 и канал 5. Давление жидкости (P) выталкивает устройство из скважины с силой равной $\pi R^2 P$. Эта сила передается на анкер и создает на его контакте со скважиной касательное нагружение, которое вместе с давлением жидкости на забой вызывает растяжение материала модели вдоль оси скважины [6]. В варианте с индентором это нагружение (S_i) сосредоточено по линии выхода краевой трещины, раскрытой индентором, и его значение приближается к $PR/2$ (рис. 2а). В варианте без индентора касательное нагружение S_a распределено по площади $2\pi RL_a$ (рис. 2б), где L_a равно одному-двум R . В этом случае S_a не превышает $P/2$.

На рис. 3 приведена схема лабораторного стенда для проведения экспериментов. В его состав входят модель, гидравлическая и измерительная системы. Модель представляет собой блок оргстекла размером $250 \times 400 \times 600$ мм с просверленными в нем скважинами диаметром 16 мм и глубиной 80–120 мм.

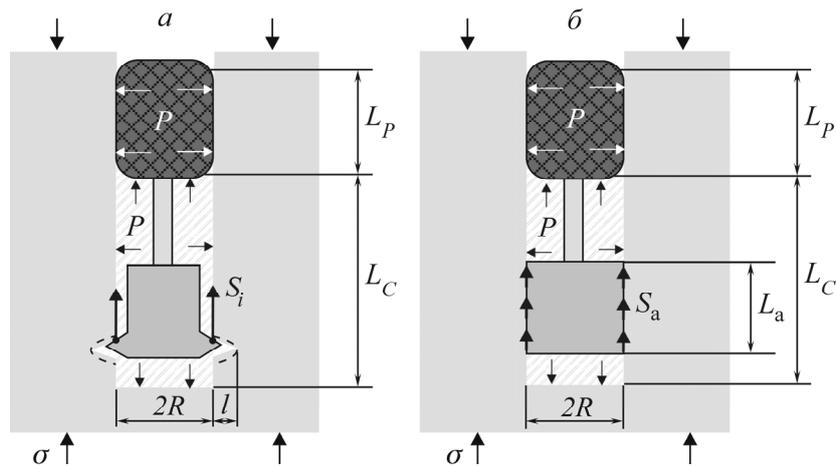


Рис. 2. Схема нагружения поверхности скважины при гидроразрыве с анкером: *а* — анкер с индентором; *б* — анкер без индентора; L_P — интервал герметизации; L_C — интервал разрыва

Гидравлическая система станда представлена устройством гидроразрыва А1, ручным насосом высокого давления Н с обратным клапаном КО на выходе, пресс-расходомером Ц, вентилем ВН, манометром МН, соединительными рукавами высокого давления.

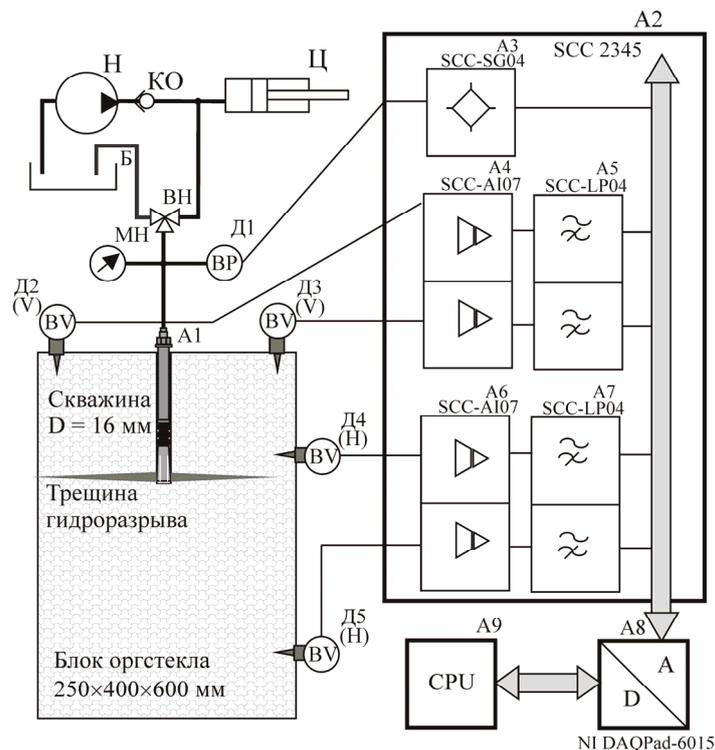


Рис. 3. Схема лабораторного станда для исследований направленного гидроразрыва

Измерительная система станда включает датчик давления Д1, геофоны Д2–Д5, крейт А2 системы сбора данных с установленными в нем модулями А3–А7, аналого-цифровой преобразователь А8 и компьютер А9. Тензометрический датчик давления ЛХ-412/400 (ОАО “Тензоприбор”, Краснодар) обеспечивает измерение быстроменяющегося давления рабочей жидкости от 0 до 40 МПа в частотном диапазоне 0–1500 Гц с погрешностью $\pm 0.8\%$. Датчики Д2–Д5 — это геофоны GMT-12,5 (ООО “Геоспейс”, Россия) с собственной частотой 12.5 Гц. Два из них

(Д2, Д3) предназначены для измерения вертикальной компоненты скорости упругих колебаний среды, другие два (Д4, Д5) — горизонтальной компоненты. Электрические сигналы датчиков Д1–Д5 поступают на входы измерительных модулей аппаратуры SCC (National Instruments, США), установленных в кейте SCC-2345 (А2). В состав модулей входят двухканальные измерительные усилители А4, А6 (SCC-AI07), двухканальные фильтры А5, А7 низких частот SCC-LP04 с частотой среза 1 кГц, а также модуль А3 (SCC-SG04) для подключения мостовых датчиков. Выходные сигналы модулей через приборную шину кейта А2 подаются на вход аналого-цифрового преобразователя NI DAQPad-6015 (А8). Оцифрованные данные через порт USB поступают в компьютер А9. Управление сбором данных и измерительной системой стенда организовано в программной среде LabView (National Instruments, США).

Перед началом экспериментов были проведены испытания гидравлической системы стенда и определена ее жесткость. На рис. 4 представлена усредненная по нескольким испытаниям зависимость давления P от изменения объема жидкости ΔV в гидросистеме, включающей интервал разрыва.

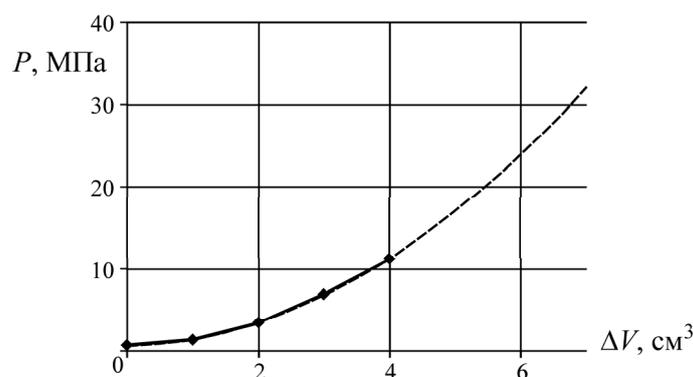


Рис. 4. Зависимость давления P в гидросистеме стенда от изменения объема жидкости ΔV

Лабораторные исследования направленного гидроразрыва и возбуждаемых им упругих колебаний выполняли по следующей методике:

- в подготовленную модель устанавливали устройство разрыва и геофоны, подключали гидравлическую и измерительную части стенда;
- запускали непрерывную регистрацию выходных сигналов датчиков Д1–Д5 с шагом дискретизации 1 мс;
- насосом Н заполняли интервал разрыва рабочей жидкостью до давления 1.0 МПа;
- пресс-расходомером Ц повышали давление рабочей жидкости в интервале разрыва вплоть до образования трещины. Разрыв фиксировали по резкому падению давления на манометре МН, после чего подачу жидкости прекращали, поддерживая гидравлическую систему в закрытом состоянии.

Пересчет сигнала, зарегистрированного датчиком Д1, в давление осуществляли по его калибровочной характеристике, полученной при испытаниях гидравлической системы. Пересчет амплитуды E электрического сигнала на выходе геофона GMT-12.5, выраженной в вольтах, в амплитуду смещений среды A_x (в метрах) проводили по формуле [7]

$$A_x = \frac{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + 4b^2\eta^2}}{2\pi f a \eta^2} E, \quad (1)$$

где $\eta = f / f_0$; $a = GR_{\text{ш}} / (R_{\text{ш}} + R_{\text{к}})$; $b = b_0 + \frac{G^2}{4\pi f_0 M (R_{\text{ш}} + R_{\text{к}})}$ — степень затухания геофона, $b_0 = 0.35$ — степень его затухания при открытой цепи, $M = 7.25 \cdot 10^{-3}$ кг — инертная масса геофона GMT-12,5, $G = 32$ В/м/с — его чувствительность, $f_0 = 12.5$ Гц — собственная частота геофона; f — частота его вынужденных колебаний, Гц; $R_{\text{ш}} = 1500$ Ом — сопротивление шунта; $R_{\text{к}} = 900$ Ом — сопротивление катушки геофона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При выполнении гидроразрывов с использованием анкера без кольцевой проточки образуется продольная трещина вдоль скважины (рис. 5а). При наличии инденторного выступа получили поперечную трещину (рис. 5б).

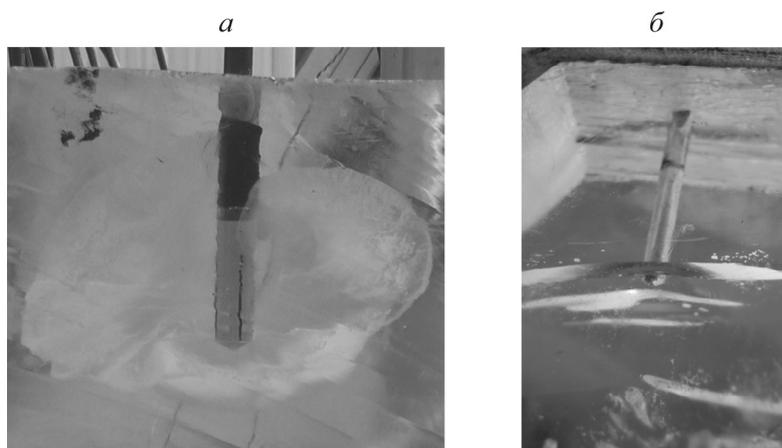


Рис. 5. Трещины гидроразрыва, полученные в экспериментах: а — продольная; б — поперечная

Сводные результаты лабораторных исследований гидроразрыва приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты лабораторных исследований ориентации трещин и давления гидроразрыва

| Схема разрыва | Ориентация трещины | Выход трещины в борт модели | Давление, МПа | | Диаметр трещины, мм |
|---------------------|--------------------|-----------------------------|---------------|-----------|---------------------|
| | | | разрыва | запирания | |
| Анкер без индентора | Продольная | Нет | 13.44 | 2.99 | 91 – 104 |
| | | | 16.52 | 2.00 | 114 – 174 |
| | | Да | 18.01 | 0 | — |
| | | | 21.13 | 0 | — |
| | | | 33.17 | 0 | — |
| | | | 20.37 | 0 | — |
| Анкер с индентором | Поперечная | Да | 29.35 | 0 | — |
| | | | 19.02 | 0 | 214 |
| | | | 14.22 | 0 | — |
| | | | 14.80 | 0 | — |

Средние давления разрыва оргстекла в экспериментах составляют: при продольном гидроразрыве 21.71 ± 5.09 МПа, при направленном поперечном гидроразрыве — 16.01 ± 4.39 МПа. Доверительные интервалы соответствуют вероятности 0.9. В обеих схемах разрыва наблюдается

значительный разброс давлений разрыва. Поскольку эксперименты проводились в одном материале, это не связано с изменчивостью свойств среды. Наиболее вероятным объяснением является разное качество бурения скважин и влияние размеров техногенных микротрещин на сопротивление оргстекла гидроразрыву. Другой причиной могут быть различия в удалении скважин от ближайшей свободной поверхности. Так, продольный разрыв в окрестности поперечной трещины произошел при аномально низком давлении 7.65 МПа. Важно, что при разрыве с индентором во всех эксперимента формировалась поперечная трещина. Полученные данные показали работоспособность рассматриваемого способа направленного поперечного гидроразрыва.

На рис. 6 приведены графики спада давления, форма и амплитудные спектры сейсмических импульсов, полученные при гидроразрыве.

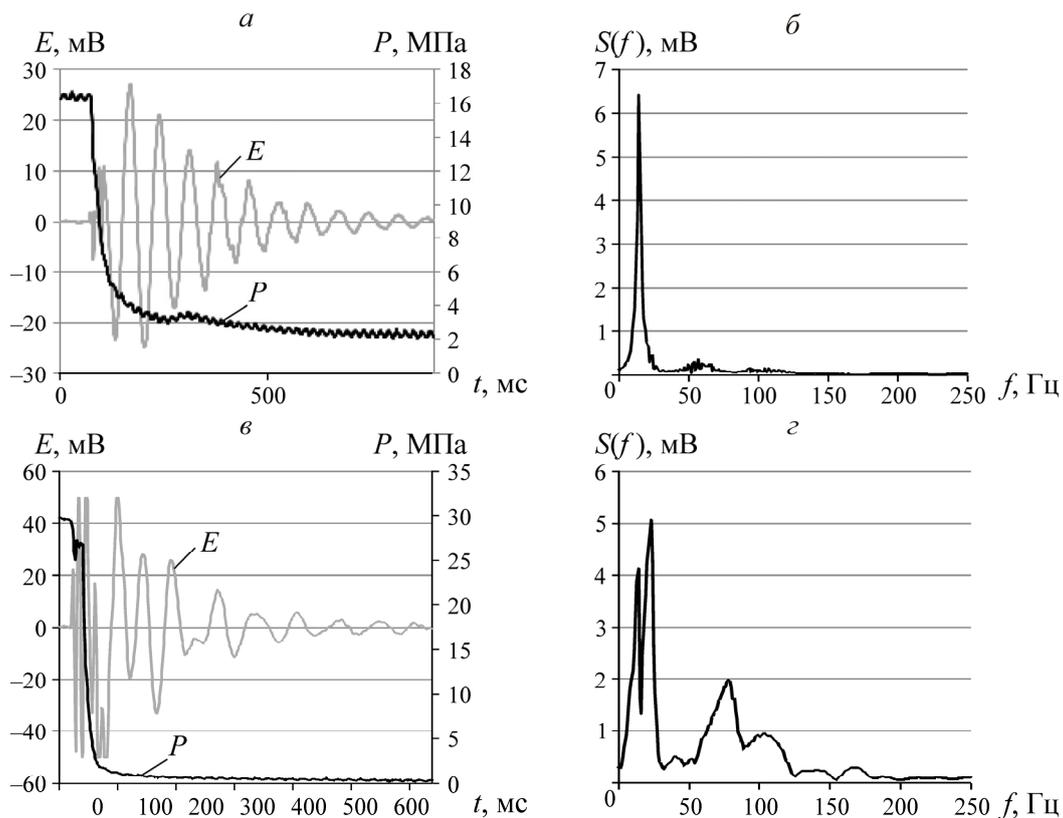


Рис. 6. Графики спада давления $P(t)$, форма $E(t)$ и амплитудные спектры $S(f)$ сейсмического импульса при продольном гидроразрыве скважины (схема разрыва: анкер без индентора): а, б — без выхода трещины в борт модели; в, г — трещина вышла в борт модели

Спектры рассчитаны в пакете анализа программы Excel (Микрософт) по выборкам сигналов длительностью 1.024 с или 1024 отсчета через 1 мс, из которых 1000 отсчетов взято с начала резкого спада давления рабочей жидкости гидроразрыва. Для всех полученных сейсмограмм продольного гидроразрыва характерны следующие особенности:

— с началом образования трещины и резкого спада давления формируется короткий, длительностью 1–2 периода сейсмический импульс (рис. 6а, в) с основной частотой колебаний 58–79 Гц (рис. 6б);

— к концу резкого падения давления или сразу после его окончания режим сейсмического излучения меняется. Возникают продолжительные колебания частотой 13–25 Гц (рис. 6б, г), длительность которых составляет 10–12 периодов, а максимальная амплитуда выше, чем ко-

лебаний частотой 58–79 Гц (рис. 6а). Форма этого низкочастотного импульса близка к экспоненциально затухающей синусоиде. Большая его часть приходится на время после стабилизации давления в интервале разрыва;

— в отдельных экспериментах после резкого падения давления наблюдается небольшой его всплеск (рис. 6а).

При поперечном гидроразрыве по схеме с индентором высокочастотный сейсмический импульс отсутствует, а низкочастотный значительно слабее, чем при продольном разрыве, и его начало приходится на всплеск давления в конце его резкого спада (рис. 7).

Промежуток времени между началом гидроразрыва (начало резкого падения давления) и возбуждением низкочастотного сейсмического импульса составляет в экспериментах 0.26–0.29 с. При расстоянии между скважиной и геофоном 0.4 м и измеренной скорости поперечной волны в оргстекле 1130 м/с это запаздывание на четыре порядка больше времени пробега волны. Время развития трещины, скорость которой в оргстекле составляет 51–194 м/с [8], также существенно меньше наблюдаемого отставания сейсмического излучения от падения давления в интервале разрыва. Отсюда следует, что наблюдаемый низкочастотный импульс не связан с разрушением оргстекла и основная сейсмическая энергия излучается при гидроразрыве после возникновения трещины. Вероятным источником этого продолжительного излучения являются колебания берегов трещины при ее заполнении жидкостью и взаимодействии с упругим объемом гидравлической системы оборудования гидроразрыва. Об этом свидетельствуют всплеск давления после его резкого спада, а также характер наблюдаемого в экспериментах сейсмического излучения. Исследования в этом направлении представляют значительный практический интерес для развития технологии микросейсмического мониторинга гидроразрыва пластов.

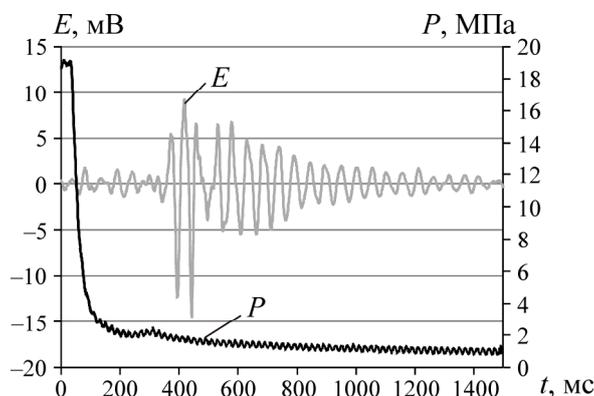


Рис. 7. График спада давления $P(t)$ и форма $E(t)$ сейсмического импульса при поперечном гидроразрыве скважин. Схема разрыва: анкер с индентором

Полученные данные использованы для сравнения сейсмической энергии, излучаемой в виде низкочастотного сейсмического импульса, и изменения энергии упругого объемного сжатия гидравлической системы при гидроразрыве. Сейсмическую энергию оценивали через плотность ее потока, усредненную по всем четырем геофонам, установленным на поверхности модели:

$$\Phi = 2\pi^2 \rho V_p f^2 A_x^2, \quad (2)$$

где $\rho = 1180 \text{ кг/м}^3$ — плотность оргстекла; $V_p = 1970 \text{ м/с}$ — скорость в нем продольных волн; A_x, f — соответственно амплитуда и частота колебаний смещения среды. Значения f и $A_x(f)$ определяли по амплитудным спектрам сейсмических сигналов с пересчетом в смещения по формуле (1) (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Входные данные для расчета энергии низкочастотного сейсмического импульса

| Эксперимент | f , Гц | Число периодов в импульсе | Длительность импульса τ , мс | Среднее значение по геофонам | |
|------------------|----------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------|
| | | | | $E = S(f)$, мВ | A_x , мкм |
| 1 | 15 | 10 | 667 | 6.43 | 4.25 |
| 2 | 18 | 4 | 222 | 0.93 | 0.47 |
| 3 | 18 | 11 | 611 | 9.03 | 4.52 |
| 4 | 16 | 11 | 688 | 9.23 | 5.50 |
| Среднее значение | 16.75 | — | 547 | — | 3.69 |

Используя данные табл. 2 и формулу (2), получили среднее значение потока энергии $\Phi = 0.067$ Дж/(м²·с). Энергию, излучаемую в модель в виде низкочастотного сейсмического импульса, рассчитывали по формуле $W_s = \Phi \tau A$, где $A = 0.98$ м² — площадь поверхности модели; τ — длительность колебаний. Среднее значение W_s в экспериментах составляет 0.04 Дж.

Для оценки изменения энергии упругого объемного сжатия гидравлической системы при гидроразрыве использовали зависимость давления P в закрытой гидросистеме от изменения объема жидкости ΔV (см. рис. 4). Изменение энергии упругого объемного сжатия гидравлической системы ΔW_G во время излучения низкочастотного сейсмического импульса вычисляли по формуле

$$\Delta W_G = P_C (\Delta V|_{P_C} - \Delta V|_{P_{\text{end}}}), \quad (3)$$

где P_C — давление гидроразрыва; P_{end} — давление в интервале разрыва в момент прекращения заметных колебаний. Значения этих величин, полученные в экспериментах, приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Входные данные и результаты расчета изменения энергии упругого объемного сжатия гидравлической системы стенда при излучении низкочастотного сейсмического импульса

| Эксперимент | P_C , МПа | P_{end} , МПа | $\Delta V(P_C) - \Delta V(P_{\text{end}})$, см ³ | ΔW_G , Дж |
|------------------|-------------|------------------------|--|-------------------|
| 1 | 16.5 | 2.1 | 3.5 | 58 |
| 2 | 20.4 | 1.2 | 5.3 | 108 |
| 3 | 31.2 | 2.4 | 5.4 | 168 |
| 4 | 29.4 | 0.1 | 6.5 | 191 |
| Среднее значение | 24.4 | 1.5 | 5.2 | 131 |

Сравнение значений W_s (0.04 Дж) и ΔW_G (131 Дж), рассчитанных по формулам (2), (3), показывает, что энергия сейсмического излучения составляет около 0.03 % от изменения энергии упругого объемного сжатия гидравлической системы гидроразрыва.

ВЫВОДЫ

Экспериментально показана возможность получения направленного гидроразрыва горных пород за счет дополнительного касательного нагружения стенок скважины в интервале разрыва. Закрепление герметизатора на забое необсаженной скважины кольцевым анкером с площадью контакта в 2–4 раза меньше ее поперечного сечения снижает давление гидроразрыва и формирует трещину поперек оси скважины.

Установлено, что основное сейсмическое излучение при гидроразрыве не связано с разрушением материала модели и возникает после образования трещины. Сейсмический импульс имеет форму экспоненциально затухающей синусоиды низкой частоты с большим видимым числом периодов (до 10–12). Энергия сейсмического излучения составляет около 0.03 % от изменения энергии упругого объемного сжатия гидравлической системы гидроразрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Леконцев Ю. М., Сажин П. В.** Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С.137–142.
2. **Пат. 2522677 РФ.** Способ направленного гидроразрыва массива горных пород (приоритет от 27.09.2012) / С. В. Сердюков, А. В. Патутин, А. С. Сердюков, Т. В. Шилова // Оpubл. в БИ. — 2014. — № 20.
3. **Шилова Т. В., Сердюков С. В.** Защита действующих дегазационных скважин от поступления воздуха из горных выработок через вмещающие породы // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 179–186.
4. **Яскевич С. В., Гречка В. Ю., Дучков А. А.** Обработка данных микросейсмического мониторинга геодинамических событий с учетом сейсмической анизотропии массива горных пород // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 41–52.
5. **Логинов Г. Н., Яскевич С. В., Дучков А. А., Сердюков А. С.** Совместная обработка данных поверхностных и подземных систем микросейсмического мониторинга при добыче твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 100–107.
6. **Азаров А. В., Курленя М. В., Патутин А. В., Сердюков С. В.** Математическое моделирование напряженного состояния пород при касательной и нормальной нагрузках стенок скважины в интервале гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 3–10.
7. **Сейсморазведка.** Справочник геофизика / под ред. И. И. Гурвича, В. П. Понамарева). — М.: Недра, 1981. — 464 с.
8. **Атрошенко С. А., Кривошеев С. И., Петров Ю. А.** Распространение трещины при динамическом разрушении полиметилметакрилата // Журн. техн. физики. — 2002. — Т. 72. — Вып. 2. — С. 52–58.

Поступила в редакцию 20/V 2016