

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.234.573 + 620.179.17

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ НАГРУЖЕННОГО ЦЕМЕНТНОГО БЛОКА

С. В. Сердюков, Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик, В. И. Востриков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: ss3032@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Приведены результаты лабораторных исследований акустического и сейсмического излучений, возникающих при гидроразрыве нагруженного цементного блока в условиях неравнокомпонентного объемного напряженного состояния. Показана связь акустической и сейсмической эмиссий с темпом нагнетания рабочей жидкости, изменением ее давления в процессе образования, распространения и остановки трещины. Даны рекомендации по совершенствованию приемной аппаратуры и использованию полученных результатов для контроля гидроразрыва.

Породный массив, горная выработка, напряженное состояние, гидроразрыв, физическое моделирование, лабораторный эксперимент, сейсмоакустическая эмиссия, давление рабочей жидкости, измерительная аппаратура

DOI: 10.15372/FTPRPI20220606

Контроль гидроразрыва горных пород осуществляются по замерам давления и объема закаченной жидкости. Получаемых данных недостаточно для суждения о форме образующихся трещин, их ориентации в пространстве. Иногда это затрудняет оценку успешности работ. Например, при разрыве нефтяного пласта направление трещин сильно влияет на охват залежи разработкой [1]. Если они развиваются в сторону нагнетательных скважин системы поддержания пластового давления, то степень извлечения нефти снижается, растет содержание воды в добываемой продукции.

Когда работы проводят вблизи горных выработок или подземных сооружений, дополнительную информацию могут дать измерения деформации их контура или близлежащей свободной поверхности [2]. В глубине массива частичным решением проблемы является наблюдение следа трещины на стенках скважины. В отсутствии обсадной колонны это делают с помощью импрессионных пакеров [3], различных оптических приборов, высокочастотной эхолокации. Но при неоднородном напряженном состоянии и в анизотропных средах траектория трещин криволинейна [4, 5]. Для ее отслеживания необходимы дистанционные методы, среди которых наибольшее распространение получил микросейсмический мониторинг [6, 7]. Одни исследова-

тели полагают, что гипоцентры регистрируемых сейсмических событий связаны непосредственно с разрушением породного массива на фронте разрыва [8], другие считают, что наведенная сейсмичность обусловлена не возникновением самой трещины растяжения, а повышением пластового давления вокруг нее из-за утечек в среду рабочей жидкости, что провоцирует микросдвиги в зонах критического напряженного состояния вмещающих пород [9]. Есть работы, в которых причиной низкочастотной эмиссии называют автоколебания берегов трещины под действием протекающего в ней потока жидкости [10–12].

Указанные источники упругих колебаний отличаются по механизму излучения, сейсмическому моменту, который может быть определен по результатам наблюдений [13, 14]. Представляет интерес ответ на вопрос: какой из механизмов излучения доминирует в тех или иных условиях? Установить это на натурном объекте проблематично, поскольку строение и свойства породного массива известны приблизительно, а форма и траектория трещин, как правило, не контролируются. В лабораторных опытах следует учитывать масштабный фактор, размеры модели и разрывов, ожидаемый высокочастотный характер генерируемого излучения. Поскольку его параметры априори неизвестны, то для выбора и обоснования методики исследований необходимо провести предварительные эксперименты, определить частотный и динамический диапазоны упругих колебаний, возбуждаемых гидроразрывом в физической модели.

Цель настоящей работы — рассмотрение результатов изучения акустических и сейсмических упругих колебаний, возникающих при гидроразрыве цементного куба, находящегося в состоянии трехосного сжатия. Разрывы проводились в неоднородном поле напряжений вблизи цилиндрической полости, имитирующей горную выработку, подземный тоннель. Дополнительно замерялись давление разрыва и расход рабочей жидкости. Синхронная регистрация наблюдаемых величин позволяет соотнести их изменения со стадией гидроразрыва, что дает косвенную информацию о механизме генерации эмиссионного излучения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования выполнялись на стенде [15]. Измерение и регистрация данных осуществлялись с использованием аппаратуры, рассмотренной в [16]. Физическая модель в форме куба с размером ребра 420 мм изготовлена из цементно-песчаной смеси М300 (портландцемент М500 — 25 %, кварцевый песок фракции 1–3 мм и гравий фракции 3–10 мм — 75 %, минеральные добавки). Прочность на сжатие затвердевшего и выдержанного материала составляет 30 МПа. По оси модели расположена сквозная цилиндрическая полость диаметром 74 мм, параллельно которой на разных удалениях пробурено шесть скважин, в каждой из которых поочередно проведены по 3–5 гидроразрывов (рис. 1).

В полости на уровне центрального сечения модели установлены низкочастотные геофоны GS-One (полоса пропускания 10–250 Гц, чувствительность 85 В/(м/с)) и пьезоэлектрические акселерометры KD91 [17] с чувствительностью 4 мВ/г и резонансной частотой 50 кГц (g — ускорение свободного падения). Акселерометры подключены к регистрирующей аппаратуре через усилители заряда компании Брюль и Кьер тип 2635, установленный коэффициент преобразования 100 мВ/(м/с²). Диаметр полости контролировался линейным датчиком деформации с точностью 1 мкм. Давление рабочей жидкости измерялось датчиком с погрешностью ± 25 кПа.

Эксперименты проводились в следующем порядке. Подготовленную модель устанавливали в камеру и равномерно нагружали ее боковые грани давлениями F_{h1} и F_{h3} , вертикальные — давлением F_{v2} . Эксперименты в скважинах 1–3 выполнены в условиях $F_{h1} = F_{h3} = F_{v2} = 4.3$ МПа, в скважинах 4–6 — при нагрузке F_{h1} в 2 раза большей (8.6 МПа). После герметизации выбранной скважины в нее закачивали рабочую жидкость. Для нагнетания использовали ручной

пресс, обеспечивающий непрерывную подачу жидкости с постоянным заданным расходом. С началом падения давления закачку либо останавливали, либо продолжали еще 3–6 с в медленном (~ 0.1 мл/с), среднем (~ 1 мл/с) или быстром (~ 5 мл/с) темпе.

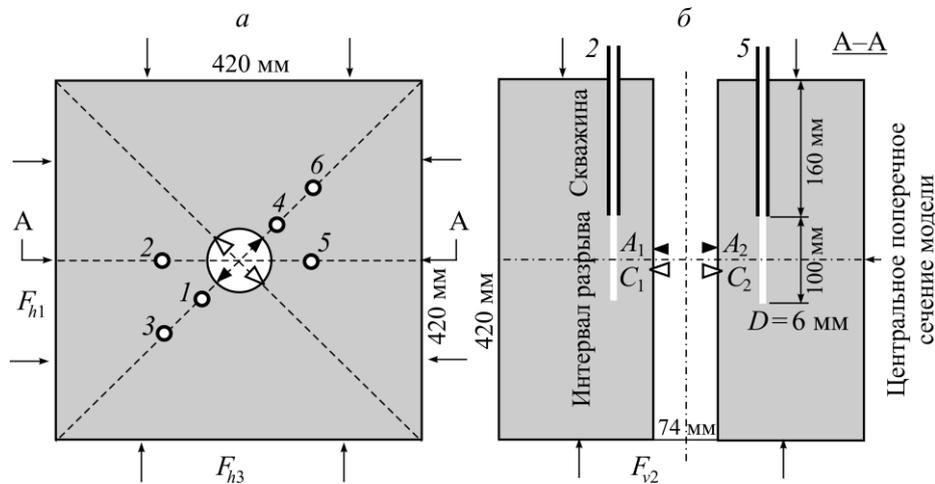


Рис. 1. Физическая модель (цементный куб): *a* — вид сверху; *б* — разрез А–А; A_1, A_2 — акселерометры; C_1, C_2 — геофоны; 1–6 — скважины

Регистрация акустических сигналов осуществлялась непрерывно с частотой дискретизации 40 кГц. Отдельные импульсы записывались в коротких временных окнах с частотой дискретизации до 200 кГц. Большеразмерный файл обрабатывался на виртуальном приборе readAC.vi, созданном в программной среде LabView.

На рис. 2 показан скриншот с результатами обработки экспериментальных данных: слева — окно виртуального самописца с отфильтрованными сигналами давления разрыва (верхняя запись) и акустической эмиссии (нижние записи), справа — окно анализатора спектра, показывающего среднеквадратичное значение (RMS) спектральной плотности мощности акустического излучения, усредненное по 20–100 замерам (5–25 с). Для сглаживания выборок применяли окно Ханна. Частотный диапазон анализа долговременных записей составляет до 20 кГц (ниже частоты Найквиста), записей импульсов — до 100 кГц.

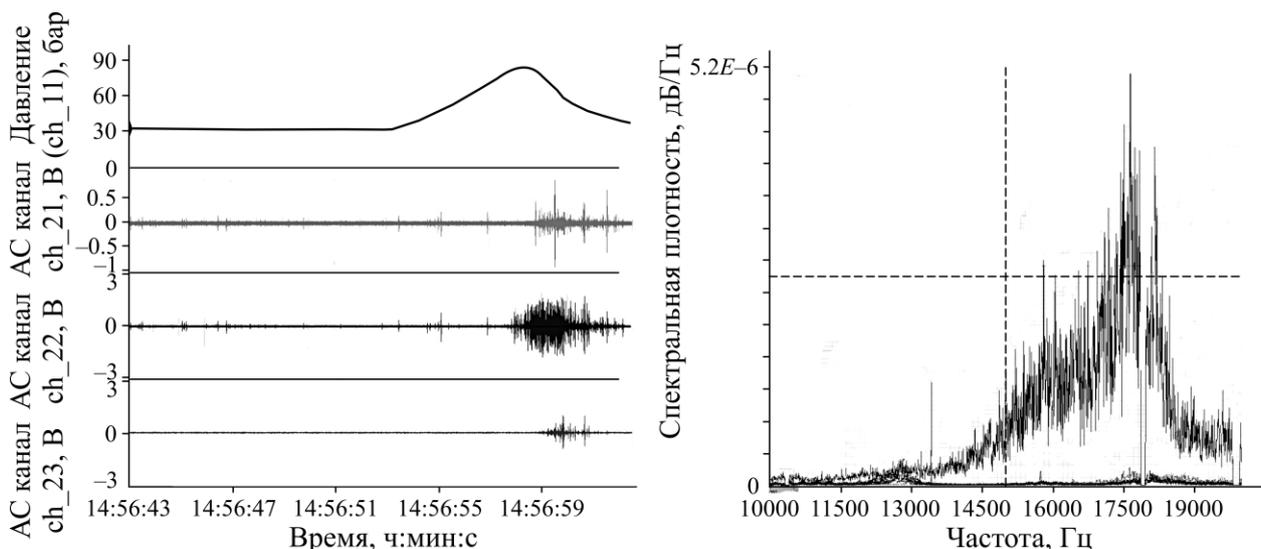


Рис. 2. Результаты обработки экспериментальных данных виртуальным прибором readAC.vi: равномерное нагружение модели, гидроразрыв в скважине 1 с остановкой закачки на пике давления

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе экспериментов наблюдались следующие особенности гидроразрыва и сопутствующей ему акустической эмиссии. Максимальное давление P_c , требуемое для инициирования разрушения модели, зависит от удаления скважины от поверхности полости s , присутствие которой вызывает локальную разгрузку среды (таблица). Это дает возможность изучать влияние горного давления на акустическую эмиссию гидроразрыва, не меняя нагружение модели, т. е. в стабильных условиях.

Номер скважины	$F_{h1} / F_{h3} / F_{v2}$, МПа	s , мм	Давление разрыва P_c , МПа				
			Цикл 1	Цикл 2	Цикл 3	Цикл 4	Цикл 5
1	4.3/4.3/4.3	23	8.4	5.0	2.8	—	—
2	4.3/4.3/4.3	48	11.9	5.1	3.2	3.1–3.4	2.3–2.5
3	4.3/4.3/4.3	83	13.0	10.0	4.8	2.6	2.5
4	8.6/4.3/4.3	23	7.7	4.0	3.7	—	—
5	8.6/4.3/4.3	48	12.2	7.3	6.8	—	—
6	8.6/4.3/4.3	83	13.8	9.2	7.8	7.5	6.5

На рис. 3 приведена фотография поверхности центрального поперечного разреза модели (рис. 1) с отчетливо видимыми траекториями полученных трещин. Отметим, что при выполнении в скважине трех циклов разрыва (скважины 1, 4) образующаяся трещина не выходит на внешние грани модели, а при пяти циклах (скважины 2, 3, 5, 6) — выходит. Часть трещин в своем развитии соединились между собой (рис. 3).

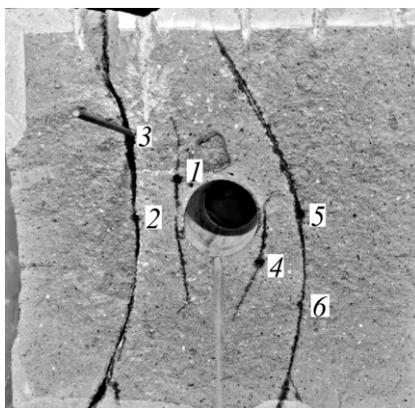


Рис. 3. Центральный поперечный разрез модели с траекториями образовавшихся в ходе экспериментов трещин гидроразрыва: 1–6 — номера скважин

Первый цикл разрывов во всех скважинах проводился с остановкой закачки рабочей жидкости в момент начала падения ее давления. С приближением к пиковому значению темп приращения давления заметно снижался (рис. 4). С этим замедлением связаны и первые всплески акустического излучения, наблюдаемые в большинстве экспериментов. По всей видимости, трещина начинает формироваться до достижения максимума давления, однако приращение ее объема на начальной стадии развития, когда закачка еще продолжается, хоть и замедляет рост давления, но не приводит к его падению. Важно, что гидроразрыв начинается при давлении ниже максимального, и это надо учитывать при интерпретации получаемых данных.

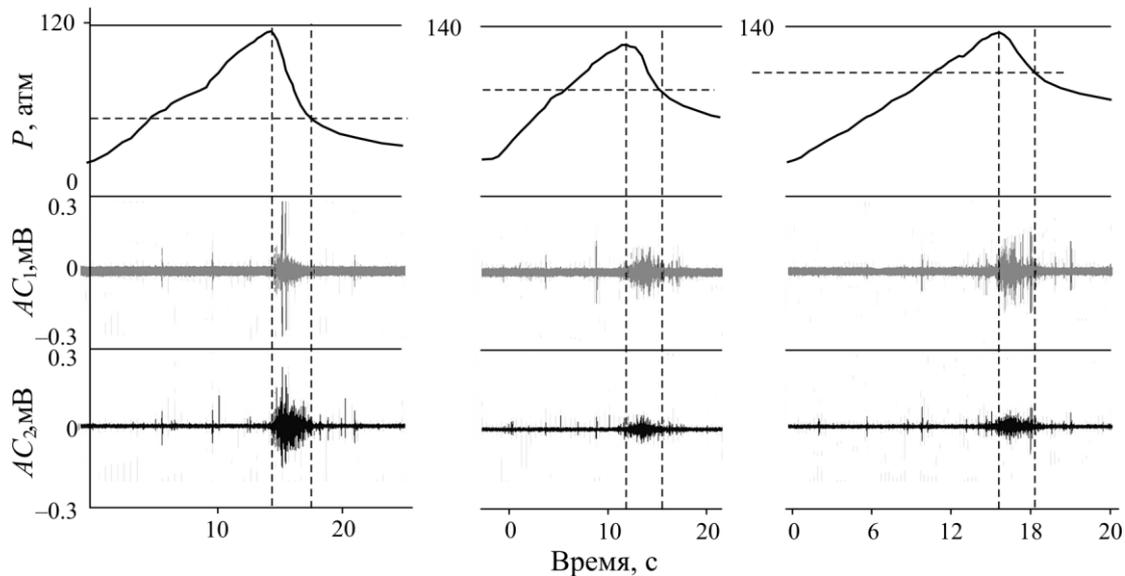


Рис. 4. Давление рабочей жидкости и акустические сигналы AC_1 , AC_2 датчиков A_1 , A_2 при проведении первых циклов гидроразрыва в скважинах 2, 5 и 6 (слева направо). Амплитуда акустических сигналов приведена к выходу усилителя заряда

Второй и последующие циклы разрыва выполнялись в режиме поддержания распространения трещины (продолжая закачку жидкости в процессе ее развития) (рис. 5). Наблюдались колебания давления с размахом (двойной амплитудой) 4–5 атм и видимым периодом длительно-стью 0.2–1.0 с.

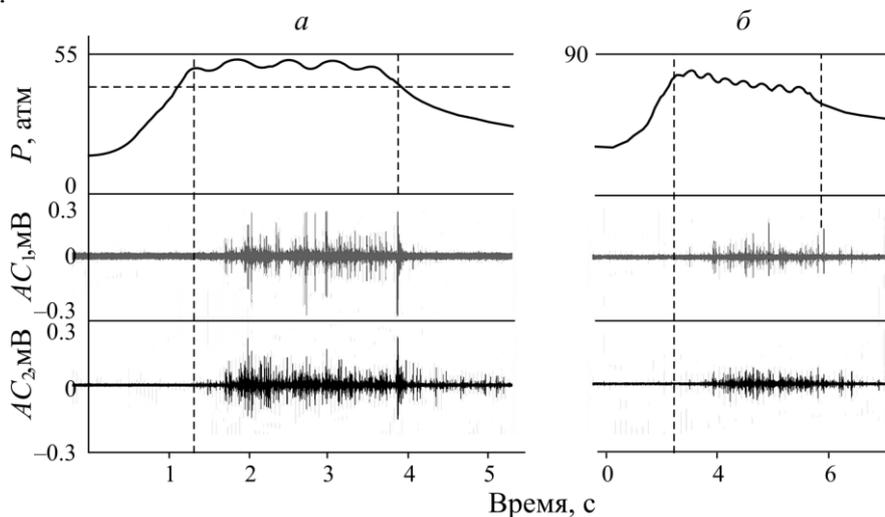


Рис. 5. Давление жидкости и акустические сигналы AC_1 , AC_2 датчиков A_1 , A_2 при проведении повторных циклов гидроразрыва в режиме поддержания роста трещины: *а* — в скважине 1 (цикл 2); *б* — в скважине 6 (цикл 5)

Характерно, что первые всплески акустического излучения на рис. 4 наблюдаются только через десятые доли секунды после первого максимума давления. Обычно этот максимум связывают с началом развития ранее созданной трещины, иногда с ее раскрытием под действием нагнетаемой жидкости. Если полагать, что развитие трещины сопровождается акустическим излучением, то разрыв в экспериментах рис. 5 стартует со второго пика давления, имеющего наибольшее значение. В пользу того, что первый пик на рис. 5 не связан с развитием трещины, свидетельствуют и данные экспериментов с более низким темпом нагнетания рабочей жидкости (рис. 6).

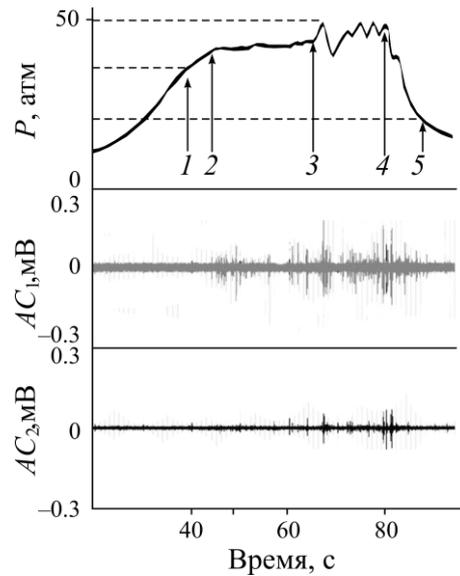


Рис. 6. Давление жидкости и акустические сигналы AC_1 , AC_2 датчиков A_1 , A_2 при проведении повторного цикла гидроразрыва в режиме поддержания роста трещины в скважине 4 (цикл 2): 1 — раскрытие трещины; 2 — начало акустического излучения (начало развития трещины); 3 — увеличение темпа нагнетания рабочей жидкости; 4 — окончание акустического излучения гидроразрыва (остановка развития трещины)

В этом случае на восходящей ветви отмечается четкий излом (1), соответствующий классическому представлению о реакции давления рабочей жидкости на раскрытие трещины гидроразрыва [18]. При этом, как и на рис. 6, акустического излучения нет. Оно начинается позже, в момент времени (2), интерпретируемый как начало развития трещины в повторном цикле. В промежуток времени (2)–(3) распространение трещины в эксперименте поддерживалось за счет нагнетания рабочей жидкости в низком темпе (0.1 мл/с). Наблюдались колебания давления с размахом приблизительно 1 атм и периодом 0.5 с. После повышения в (3) темпа нагнетания до 5 мл/с давление рабочей жидкости возросло на 8 атм, усилились размах (до 8–10 атм) и частота его пульсаций (до 4–5 Гц), акустическое излучение (рис. 6).

Остановка закачки (4) сопровождается всплеском акустического сигнала, давление рабочей жидкости быстро снижается (рис. 5, 6). Но эмиссия наблюдается еще некоторое время (4)–(5) и при падении давления (рис. 4–6), т. е. трещина продолжает распространяться и при неработающем насосе, очевидно за счет упругого объема гидравлической системы устройства разрыва. В момент останова трещины акустический сигнал прекращается, а падение давления несколько замедляется, что вполне объяснимо. Если до этого его спад происходил за счет роста трещины и утечек рабочей жидкости во вмещающую среду, то после останова трещины — только за счет утечек. Значение давления в момент смены указанных режимов можно определить из анализа нисходящей ветви графика $P(t)$. Известно, что для длинной трещины (более 5–10 м) оно чуть выше ее сжатия вмещающей средой, т. е. примерно равно минимальному напряжению σ_{\min} , действующему в среде [18]. В модельном эксперименте трещины короткие и это давление существенно выше σ_{\min} . По мере развития трещины в повторных циклах гидроразрыва оно снижается, но остается больше, чем σ_{\min} (вне зоны разгрузки напряжений вблизи полости). Так, в наиболее удаленной от полости скважине 6 акустический сигнал от гидроразрыва в циклах 1–5 прекращался при давлениях соответственно 96, 88, 67, 56 и 53 атм. Похожая ситуация происходит и при измерении напряженного состояния в натуральных условиях с использованием небольших устройств гидроразрыва и малых объемов рабочей жидкости [19].

Важно, что контроль акустической эмиссии гидроразрыва повышает достоверность определения характерных точек кривой $P(t)$, связанных с началом и прекращением роста трещины.

Как показали эксперименты, частотный диапазон излучаемых гидроразрывом сигналов достаточно стабилен и от эксперимента к эксперименту меняется незначительно. На рис. 7 представлены спектральные плотности акустического излучения разрывов в скважинах 1 и 4. Разница амплитудных значений обусловлена взаимным расположением датчиков и скважин (рис. 1), а частного отклика, предположительно, — разными условиями на контакте акселерометров со средой. Первый из них A_1 находится ближе всех к скважине 1 (рис. 1). По его показаниям акустическое излучение гидроразрыва в экспериментах происходит на частотах от 14–16 кГц и до верхней границы анализируемого диапазона (20 кГц). Вторым датчик A_2 находится рядом со скважиной 4. По его показаниям, частоты сигналов начинаются примерно с 17 кГц. Такая неидентичность приемных каналов является серьезной проблемой при определении сейсмических моментов регистрируемых событий, которую предстоит решить.

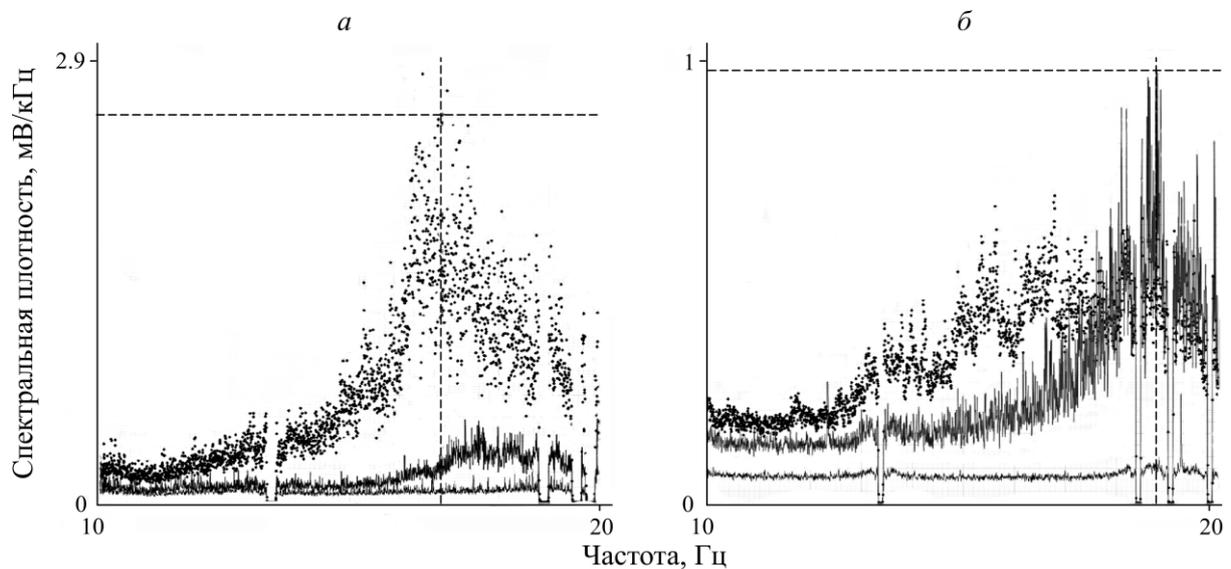


Рис. 7. Накопленная по 100 замерам спектральная плотность акустического излучения в первых циклах гидроразрыва в скважинах 1 (а) и 4 (б): точечная диаграмма — по замерам датчиком A_1 ; линия — по замерам датчиком A_2

На рис. 8 показаны форма одиночного сигнала акустической эмиссии и его спектр, записанные датчиком A_1 и цифровой аппаратурой с коротким временным окном регистрации (10 тыс. точек).

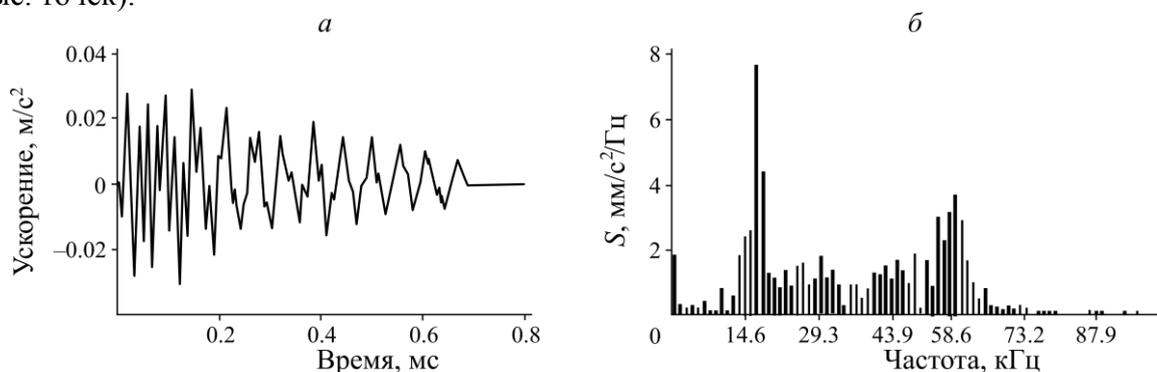


Рис. 8. Форма одиночного сигнала акустической эмиссии (а) и его амплитудный спектр (б). Гидроразрыв в скважине 1, датчик A_1

Спектральный максимум одиночного сигнала согласуется с накопленной спектральной плотностью акустической эмиссии на рис. 6. Но есть и второй, менее выраженный пик на 54–60 кГц (рис. 7б). Поскольку высокочастотный сигнал лучше подходит для локации гипоцентров регистрируемых микросейсмических событий (в силу меньшей длины волны), то в планируемых экспериментах следует расширить частотный диапазон приемной аппаратуры до 100 кГц, для чего оснастить ее быстродействующим многоканальным аналого-цифровым преобразователем с частотой дискретизации от 200 кГц и выше на канал.

Пульсации давления в трещинах, обнаруженные в опытах, генерируют низкочастотное сейсмическое излучение, регистрируемое геофонами C_1 , C_2 (рис. 9). Из сейсмограмм видно, что в первом цикле гидроразрыва низкочастотное излучение представлено малоамплитудными всплесками, приуроченными как к закачке рабочей жидкости, так и к начальной стадии спада давления до момента прекращения трещинообразования. В повторных циклах, которые выполнялись в режиме поддержания распространения трещины, амплитуда сейсмических сигналов увеличивается на порядок с отчетливыми всплесками в моменты начала развития трещины и остановки закачки рабочей жидкости (рис. 9а). Частотный диапазон излучения составляет 1–5 Гц, что соответствует пульсациям давления в трещине.

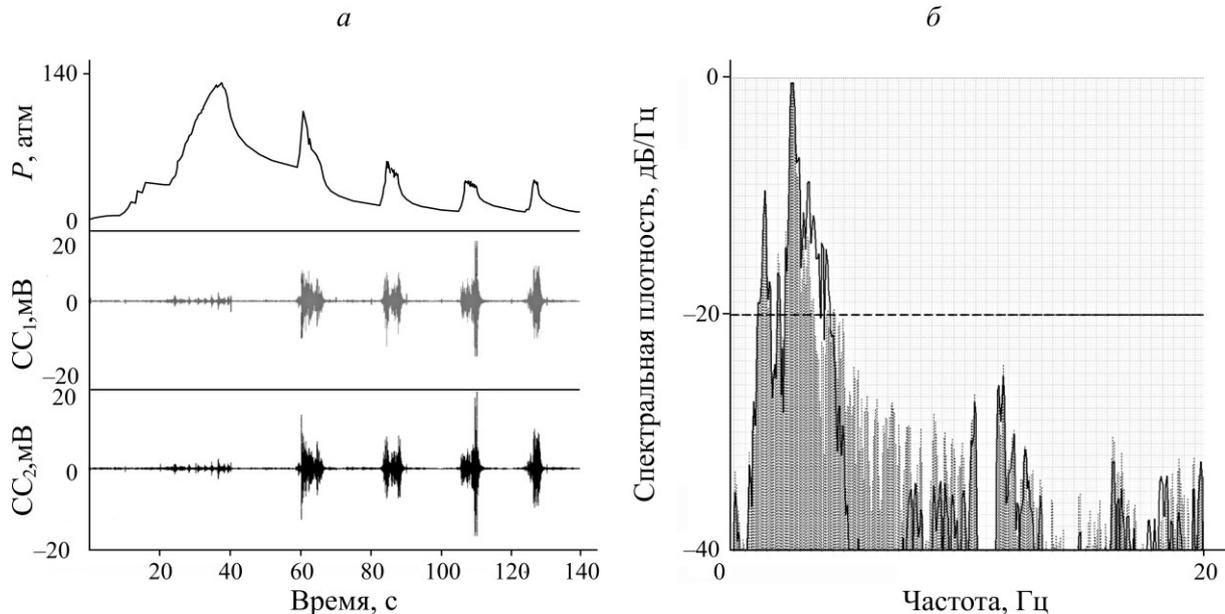


Рис. 9. Сейсмическое излучение при гидроразрывах в скважине 3: а — графики давления и выходные сигналы датчиков C_1 , C_2 ; б — спектральная плотность сейсмического излучения (штриховка — сигнал CC_1 , линия — сигнал CC_2 , сигнал в полосе частот 12.05–12.45 Гц подавлен режекторным фильтром)

В [12] представлены результаты численных исследований колебаний трещин при потоке в них жидкости. Однако полученные там оценки частотного диапазона колебаний, отнесенные к коротким разрывам в лабораторных условиях, не совпадают с экспериментальными данными, приведенными на рис. 9б. Возможно, это связано с особенностями взаимодействия растущей трещины и гидравлического оборудования. Очевидно, что быстрое увеличение объема трещины компенсируется упругим объемом гидросистемы разрыва. По мере исчерпания запаса энергии трещина останавливается и начинает закрываться. Производительность насоса ограничена, поэтому для повторного повышения давления до уровня, обеспечивающего следующее прира-

щение трещины, необходимо некоторое время. Это приводит к скачкообразному характеру развития разрыва, представляющему собой автоколебательный процесс. Его частота зависит от параметров трещины и гидросистемы используемого оборудования, напряженного состояния и упругости пород. Важен сам факт, что в режиме распространения трещины происходит излучение низкочастотных сейсмических волн, слабо затухающих и доступных для наблюдения на значительных расстояниях.

На рис. 10 схематически показаны экспериментально установленные диагностические возможности акустического и сейсмического контроля гидроразрыва. Акустическая эмиссия может быть использована для повышения достоверности определения давлений начала распространения трещины гидроразрыва (P_c) и ее остановки (P_s), реагирует на увеличение темпа нагнетания жидкости в трещину. По акустическому излучению не удастся определить давление открытия трещины в повторных циклах. Сейсмическая эмиссия позволяет отслеживать пульсации давления в трещине, контролировать режим ее распространения.

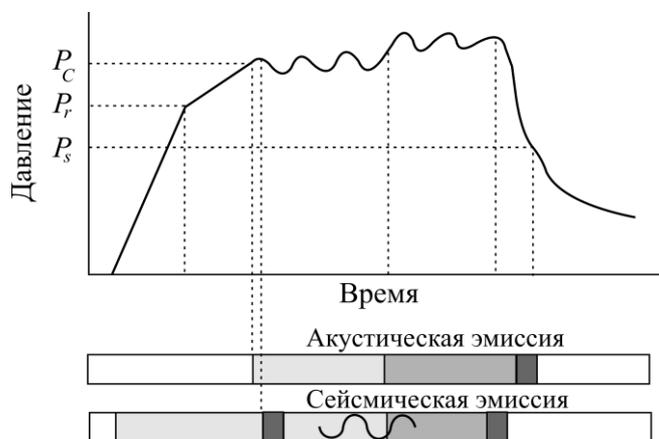


Рис. 10. Схема диагностических возможностей акустического и сейсмического контроля гидроразрыва горных пород

На основании полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности комплексного контроля гидроразрыва в сейсмическом и акустическом диапазонах частот. Так, наблюдение акустической эмиссии может помочь при измерении напряжений методом гидроразрыва, в частности повысить точность определения характерных точек давления, используемых в расчетной схеме.

Регистрация низкочастотной сейсмической эмиссии, вызванной взаимодействием гидравлической системы оборудования и трещины, потоком в ней жидкости, может повысить эффективность микросейсмического мониторинга промысловых гидроразрывов, позволит диагностировать состояние ранее созданных трещин путем возбуждения в них пульсаций давления.

ВЫВОДЫ

Обнаружены следующие особенности гидроразрыва и сопутствующей ему сейсмоакустической эмиссии в нагруженном цементном блоке, содержащем полое включение, имитирующее горную выработку. Максимальное давление рабочей жидкости, требуемое для инициирования трещинообразования, зависит от удаления скважины от полости, присутствие которой вызывает локальную разгрузку напряжений в среде. С приближением к максимальному значению давления темп его прироста снижается. Одновременно возникают всплески акустического

излучения, что свидетельствует о формировании разрыва до пика давления, а не в момент его достижения, как принято считать в существующих схемах интерпретации динамики давления в процессе гидроразрыва.

В исследованном диапазоне частот до 100 кГц образование трещины гидроразрыва в нагруженном цементном блоке вызывает акустическое излучение на частотах 14–20 и 54–60 кГц. Эмиссия отмечается с начала развития трещины до ее остановки с усилением в момент прекращения закачки жидкости. Частотный диапазон излучаемых сигналов стабилен. Выраженной зависимости от параметров нагружения модели, удаления скважины от полости не выявлено.

При проведении повторных циклов гидроразрыва в режиме поддержания распространения трещины (без остановки закачки жидкости) наблюдаются низкочастотные пульсации давления рабочей жидкости амплитудой до 5 атм и частотой 1–5 Гц. Размах и частота этих пульсаций, а также интенсивность акустической эмиссии растут с увеличением темпа нагнетания жидкости в трещину. Они генерируют также сейсмическое излучение, совпадающее с ними по частоте. Как и акустическая эмиссия, это излучение усиливается в моменты начала развития трещины и остановки закачки жидкости.

Полученные результаты показывают полезность комплексного контроля гидроразрыва в сейсмическом и акустическом диапазонах частот. Наблюдение акустической эмиссии позволяет повысить точность определения характерных точек давления, используемых в расчетной схеме измерения напряжений методом гидроразрыва. Низкочастотная сейсмическая эмиссия, вызванная взаимодействием гидравлической системы оборудования и трещины, потоком в ней жидкости, может быть использована в технологии микросейсмического мониторинга гидроразрывов для диагностики состояния ранее созданных трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Янин А. Н., Черевко С. А.** Влияние направления трещин гидроразрыва пласта на показатели эксплуатации скважин // Территория Нефтегаз. — 2016. — № 12. — С. 76–81.
2. **Шер Е. Н., Михайлов А. М.** Моделирование роста осесимметричных трещин при взрыве и гидроразрыве вблизи свободной поверхности // ФТПРПИ. — 2008. — № 5. — С. 53–61.
3. **Haimson B. C. and Cornet F. H.** ISRM suggested methods for rock stress estimation. — Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF), *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003, Vol. 40. — P. 1011–1020.
4. **Azarov A., Patutin A., and Serdyukov S.** Hydraulic fracture propagation near the cavity in a poroelastic Media., *Applied Sci. (Switzerland)*, 2021, Vol. 11, No. 22. — 11004.
5. **Мартынюк П. А., Шер Е. Н.** О развитии трещины вблизи кругового отверстия с учетом внешнего поля сжимающих напряжений // ФТПРПИ. — 1996. — № 6. — С. 19–30.
6. **Grechka V. and Yaskevich S.** Azimuthal anisotropy in microseismic monitoring: a bakken case study, *Geophysics*, 2014, Vol. 79, No. 1. — P. KS1–KS12.
7. **Яскевич С. В., Дучков А. А.** Сравнение точности локации микросейсмических событий при использовании наземных и скважинных систем наблюдений // Технологии сейсморазведки. — 2013. — № 3. — С. 43–51.
8. **Erokhin G., Kremlev A., Smirnov I., Rodin S., and Baranov V.** The optimal tight oil and shale gas development based on pre-existing fracture and principal stress models: Case study, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2014. — P. 2626–2630.

9. **Malovichko D. A. and Lynch R. A.** Micro-seismic monitoring of open-pit slopes, *Mining Echo.*, 2006, Vol. 24(2). — P. 21–30.
10. **Chouet B.** Dynamics of a fluid- driven crack in three dimensions by the finite difference method, *J. Geoph. Research: Solid Earth.*, 1986, Vol. 91, No. B14. — P. 13967–13992.
11. **Das I. and Zoback M. D.** Long-period, long-duration seismic events during hydraulic stimulation of shale and tight-gas reservoirs. — Part 1: Waveform characteristics, *Geophysics*, 2013, Vol. 78, No. 6. — P. KS97–KS108.
12. **Сердюков С. В., Азаров А. В.** Возбуждение сейсмических колебаний потоком воды в трещине и определение его параметров по регистрируемому излучению // *ФТПРПИ.* — 2021. — № 5. — С. 22–34.
13. **Азаров А. В., Сердюков А. С., Яблоков А. В.** Методика определения механизмов очагов микросейсмических событий на основе моделирования полных волновых полей в горизонтально-слоистых средах // *ГИАБ.* — 2016. — № 10. — С. 131–143.
14. **Санина И. А., Ризниченко О. Ю., Кушнир А. Ф., Варыпаев А. В., Сергеев С. И., Волосов С. Г.** Различение типов микросейсмических источников по данным малоапертурных сейсмических групп // *Физика Земли.* — 2020. — № 2. — С. 127–147.
15. **Сердюков С. В., Рыбалкин Л. А., Дробчик А. В., Патутин А. В., Шилова Т. В.** Лабораторный стенд для моделирования гидравлического разрыва массива трещиноватых пород // *ФТПРПИ.* — 2020. — № 6. — С. 193–201.
16. **Сердюков С. В.** Измерительная аппаратура для лабораторных исследований гидроразрыва // *ФТПРПИ.* — 2022. — № 6. — С. 187–198.
17. **Вибропреобразователь KD-91.** URL: <https://izmeritelnyepribory.ru/view/vibrodatchiki/KD-91.html>.
18. **Bredehoeft J. D., Wolf R. G., Keys W. S., and Shutter E.** Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field in the Piceance Basin, Colorado, *J. Geol. Society of American Bulletin*, 1976, Vol. 87, No. 2. — P. 250–258.
19. **Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В.** К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // *ФТПРПИ.* — 2016. — № 6. — С. 6–14.

*Поступила в редакцию 05/XI 2022
После доработки 20/XI 2022
Принята к публикации 24/XI 2022*