АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2012, том 58, № 6, с. 756–761

АКУСТИКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ СРЕД. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 550.833

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА СКВОЗЬ ПОРИСТУЮ СРЕДУ

© 2012 г. Ю. М. Заславский, В. Ю. Заславский

Институт прикладной физики РАН
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова 46
Тел.: (831) 416-4764; факс: (831) 436-5976
E-mail: zaslav@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию: 14.09.2011 г.

Представлены результаты лабораторных экспериментов по исследованию характеристик акустической эмиссии, генерируемой потоком сжатого воздуха, фильтруемого образцами пористой пемзы с частичным флюидонасыщением и без него. Описаны конструктивные особенности лабораторной установки и детали проведенных экспериментов. Использованы пористые образцы, имеющие сухие, а также частично флюидозаполненные поры. Приведены визуальные картины спектра акустической эмиссии, возникающей при стационарной фильтрации сжатого воздуха, показаны ее амплитудно-частотные распределения, характерные для различных пористостей образцов и степени их флюидонасыщения. Показаны различия во времени релаксации уровня эмиссионного шума, проявляющиеся при резком снятии с таких образцов перепада давления, т.е. при нестационарном режиме фильтрации.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, фильтрация воздушного потока, пористая среда.

ВВЕДЕНИЕ

Акустическая эмиссия сопровождает многие физические процессы в твердых телах и имеет различные формы проявления [1–6]. Это явление подробно изучается с 70-х годов сейсмиками и акустиками, что связано с поиском возможности его применения для прогноза нефте- и газосодержания в недрах. Одним из видов акустической эмиссии является возникновение высокочастотного сейсмического шума в геологической среде, сопутствующего процессу фильтрации флюида или газа в околоскважинном пространстве и регистрируемого с помощью геофонов, установленных в скважине. Высокочастотный акустический шум – шипящий звук, возникающий при фильтрации газа сквозь пористую среду образца и регистрируемый в воздухе, также представляет собой физически родственное явление и является предметом исследования данной работы.

Проблема акустической эмиссии, возникающей в процессе фильтрации газа сквозь пористую среду, имеет прикладной и фундаментальный аспекты. Об этом свидетельствуют выводы работ, проведенных ранее многими авторами, занятыми нефте- и газоразведкой, геофизическими изысканиями на скважинах [7–13]. Теоретическое рассмотрение возбуждения упругих волн в скелете среды при фильтрации газа сквозь пористый материал также предпринято в работе [14]. Для получения качественного вида спектра упругих волн, возбуждаемых в скелете, была проанализирована модель, в которой воздушный поток, пронизывающий частично флюидонасыщенную пористую среду, выдавливает жидкие капли из сужений пор, удерживаемых там силами капиллярного натяжения ("защемленную" жидкость).

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования акустической эмиссии – воздушно-акустического шума, возникающего вследствие взаимодействия маломасштабной турбулентности потока фильтруемого газа со стенками пор. Шум регистрируется в воздухе вблизи среза образца пористой среды, через который в атмосферу вытекает фильтруемый воздушный поток. Основное внимание обращено на спектральный состав акустического шума и на параметры переходного процесса релаксации, в частности на характерное время спада уровня шума при резком снятии перепада давления на образце.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Образец пористой пемзы в виде цилиндрического столбика диаметром 1 дюйм и длиной 2.8–3 см вклеен внутрь дюритового шланга на одном из его концов и подключен другим концом к воздушному баллону с давлением в 0.3–0.4 МПа, который контролируется манометром и восстанавливается после каждого эксперимента, как это показано на

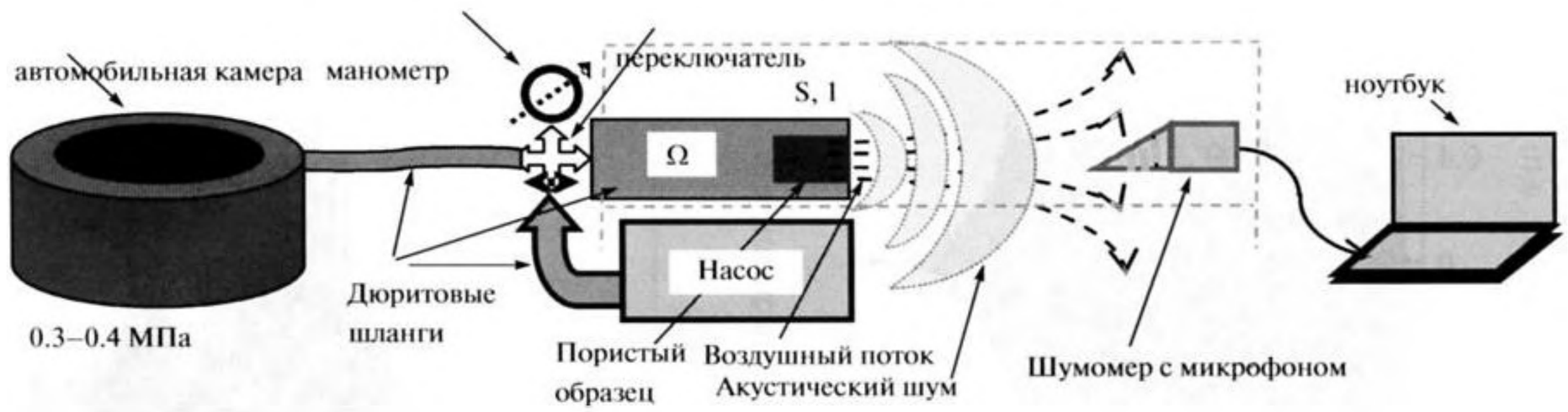

Рис. 1. Схема эксперимента.

рис. 1. Воздушный поток при открытом положении переключателя протекает сквозь образец и выходит в свободную атмосферу под действием перепада статического давления, создаваемого на длине образца. Манометр используется не только для контроля при восстановлении исходного значения перепада давления в каждом эксперименте, но и для ежесекундного считывания текущих его значений после перекрытия шланга переключателем, когда отслеживается переходный процесс спада (релаксации) уровня эмиссии. Скорость течения фильтруемого воздушного потока (сразу после открытия переключателя) оценивается интервалом 10–20 мм/с. Чтобы снизить до минимума уровень паразитных шумов, конденсаторный микрофон (Type 4135 B&K) и пористый образец с выходным шлангом помещены в звукоизолируемый ящик (габариты 1 м × 1 м × 1м), обклеенный изнутри поролоновыми листами толщиной 3 см, показанный на рис. 1 в виде пространства, обведенного штриховой линией. Уровень акустического фона внутри ящика составляет ~40–50 дБ. Расстояние от торца образца (срез шланга) до микрофона ~2–3 см. В лабораторной установке используется измерительный шумомер (Robotron Type 00 024). Приемный канал обеспечивает регистрацию полезного сигнала в памяти ноутбука через звуковую карту Audio Card PCI 7.1 ($f_{\text{строб.}}$ ~ 96 кГц), а последующая обработка – спектральный Фурье-анализ в широкой полосе частот Δf ~ 20 Гц ... 46 кГц.

На лабораторной установке (рис. 1) последовательно один за другим выполняются эксперименты по регистрации акустической эмиссии. Так, в первом эксперименте используется полностью сухой образец, а во втором – тот же образец, но частично смоченный глицерином, причем его объемное содержание составляет ~40–50% от объема пор. Глицерин выбран по соображениям близости своих характеристик (вязкость, коэффициент поверхностного натяжения при смачиваемости стенок пор) к аналогичным характеристикам для сырой нефти. Наряду с таким различием как сухой образец – смоченный образец эксперименты в каждой парной серии выполняются с двумя типами образцов: крупнопористым и мелкопористым. Пористость образцов среды составляет 10–20% – мелкопористый, 25–30% – крупнопористый образец (процентные данные представлены в сопроводительной документации на строительные материалы, а также подтверждены справочной литературой). Предварительно выполненные измерения и статистическая оценка числа каверн на 1 см^2 среза образцов и их размера показали, что средний диаметр пор образца первого типа в ~1.5 раза более крупный, чем у второго, концентрация пор в нем также выше, что обуславливает более высокую его проницаемость по газу. Поскольку важны только сравнительные данные, абсолютные значения проницаемостей здесь не указываются, поскольку последние несколько отличаются от аналогичных показателей проницаемости по жидкости, используемых в литературе. Применяемые для обозначения крупнопористый и мелкопористый термины условны, поскольку выбранные для экспериментов типы испытуемых пористых образцов представляют собой малую долю реального многообразия пород. Кроме указанного различия по пористости и проницаемости апробируются два значения перепада давления на образце (1-й случай – $\Delta p = 0.28$–0.3 МПа, 2-й случай – $\Delta p = 0.36$ МПа). Их использование позволяет выяснить степень влияния этого параметра на характер спектра эмиссии. В частности, второй случай при выборе перепада для выполнения продувки, вероятно, будет более предпочтительным в применении к образцам с мелкопористой структурой, что не исключает использования и пониженного. Для повышения надежности получаемых результатов (для проверки их повторяемости) регистрируемые в эксперименте спектры и осциллограммы дублируются несколько раз.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обратимся к рассмотрению осциллограмм и спектров акустической эмиссии, зарегистрированной на крупнопористом образце с сухими по-

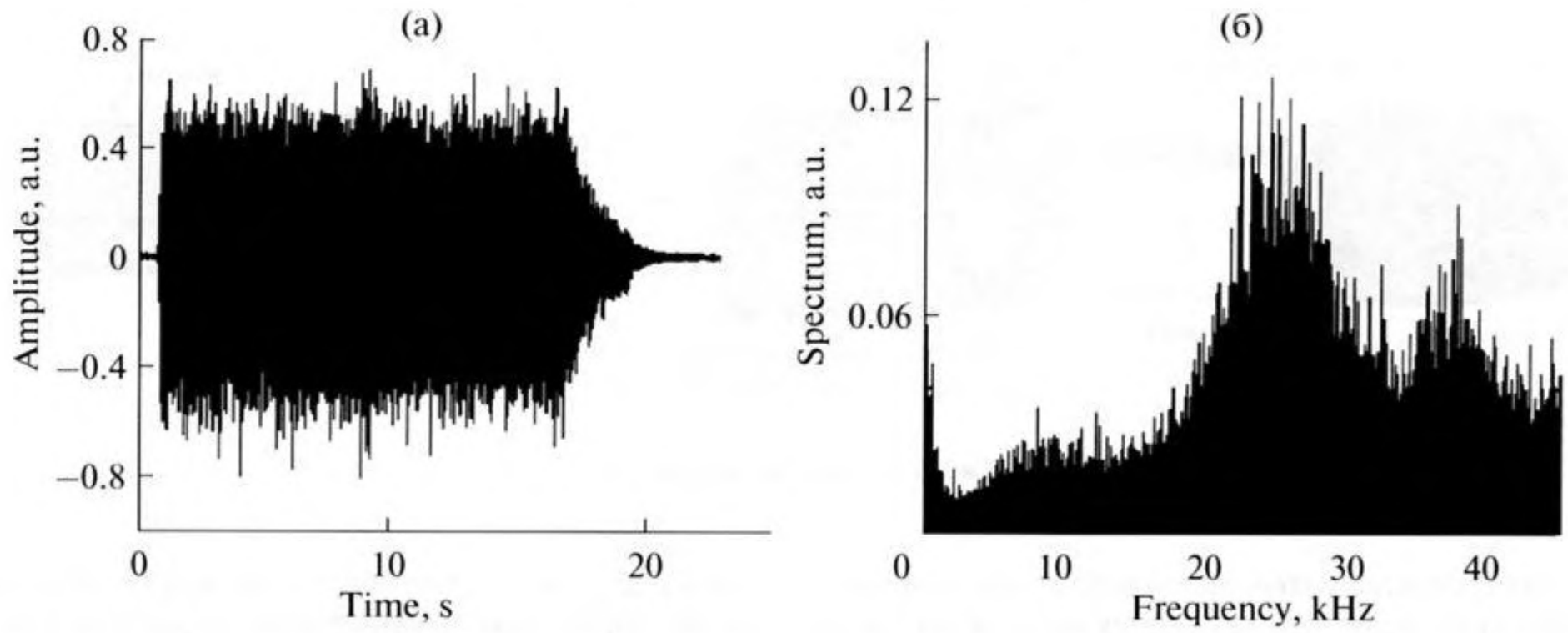

Рис. 2. Осциллограмма акустической эмиссии в стационарном и переходном режиме излучения (а), спектральная плотность мощности акустической эмиссии в стационарном режиме (б). Крупнопористый образец, сухие поры, $\Delta p = 0.3$ МПа.

рами при перепаде давления воздуха на его длине $\Delta p = 0.3$ МПа. Всюду при представлении осциллограмм и спектров вдоль оси Y используется масштаб относительных единиц. Осциллограмма акустической эмиссии, в том числе на конечном участке, соответствующем резкому падению перепада статического давления и уровня акустического шума до уровня акустического фона, а также спектральная плотность мощности акустической эмиссии, представлены на рис. 2а, 2б. Напомним, что спектр эмиссии соответствует только установившейся части осциллограммы и не отражает переходного процесса. Видно, что уровень акустической эмиссии на 20–30 дБ выше уровня акустического фона. Время переходного процесса, т.е. время релаксации уровня исследуемого шума к уровню фона составляет 2–3 с. Регистрация временных изменений уровня акустической эмиссии и статического давления, основанная на данных показаний манометра, позволяет оценить величину порогового давления $P_{\text{порог}}$, отвечающую порогу генерации эмиссии, достигаемому при спаде статического давления P от начального значения p_0 до $P_{\text{фон}}$. Несложный расчет позволяет получить временную зависимость статического давления в выходном шланге (объема Ω) при стравливании из него воздуха через пористый образец (сечения S, длины l):

$$P = \frac{p_{\text{атм}} p_0}{\left(p_0 - (p_0 - p_{\text{атм}}) e^{\frac{S\kappa p_{\text{атм}}}{\Omega \mu_{\text{возд}} l} t} \right)}. \qquad (1)$$

Из выражения (1) видно, что спад статического давления происходит по экспоненциальному закону, но из эксперимента следует, что время спада статического давления (в e раз) заметно превышает время релаксации уровня акустической эмиссии до уровня акустического фона. Измеряя значение $P_{\text{порог}}$, соответствующее $P_{\text{фон}}$, можно оценить критическое значение скорости фильтрации газа $V_{\text{крит}}$ при известном параметре проницаемости, или наоборот, – параметр проницаемости при известной критической скорости фильтрации. Это следует из зависимости, приближенно описывающей фильтрацию газа через образец пористой среды, подобной закону Дарси для жидкости:

$$V = \frac{\kappa}{\mu_{\text{возд}}} \nabla p, \qquad (2)$$

где κ – проницаемость по газу, $\mu_{\text{возд}}$ – сдвиговая вязкость газа, $\nabla p = (P - p_{\text{атм}})/l$, l – длина образца. Зависимость (2) использовалась при выводе формулы (1).

Так, задаваясь $\kappa = 10^{-13}$–10^{-12} м^2 (разброс для двух типов образцов), $\mu_{\text{возд}} = 2 \times 10^{-5}$ кг/м с, учитывая $l = 3 \times 10^{-2}$ м, а также используя экспериментально измеренную величину $P_{\text{порог}} \approx (1.5–2) \times 10^5$ кг/м с^2, с помощью (2) получаем $V_{\text{крит}} = 0.1$–1 см/с. Эта оценка согласуется с данными о скорости фильтрации, полученными из видеонаблюдения сигаретной дымовой дорожки, образующей шлейф на срезе выпускного шланга, в котором расположен пористый образец. Нетрудно также получить оценку времени переходного процесса при снижении перепада статического давления на образце, когда отсоединяется баллон со сжатым воздухом. Время спада (в e раз), согласно (1), составляет $\tau = \frac{\Omega \mu_{\text{возд}} l}{S\kappa p_{\text{атм}}} \approx 60$ с, что соответствует сделанному выше утверждению о заметном превышении 2–3 с интервала, представляющего длительность спада уровня акустической эмиссии до уровня акустического фона.

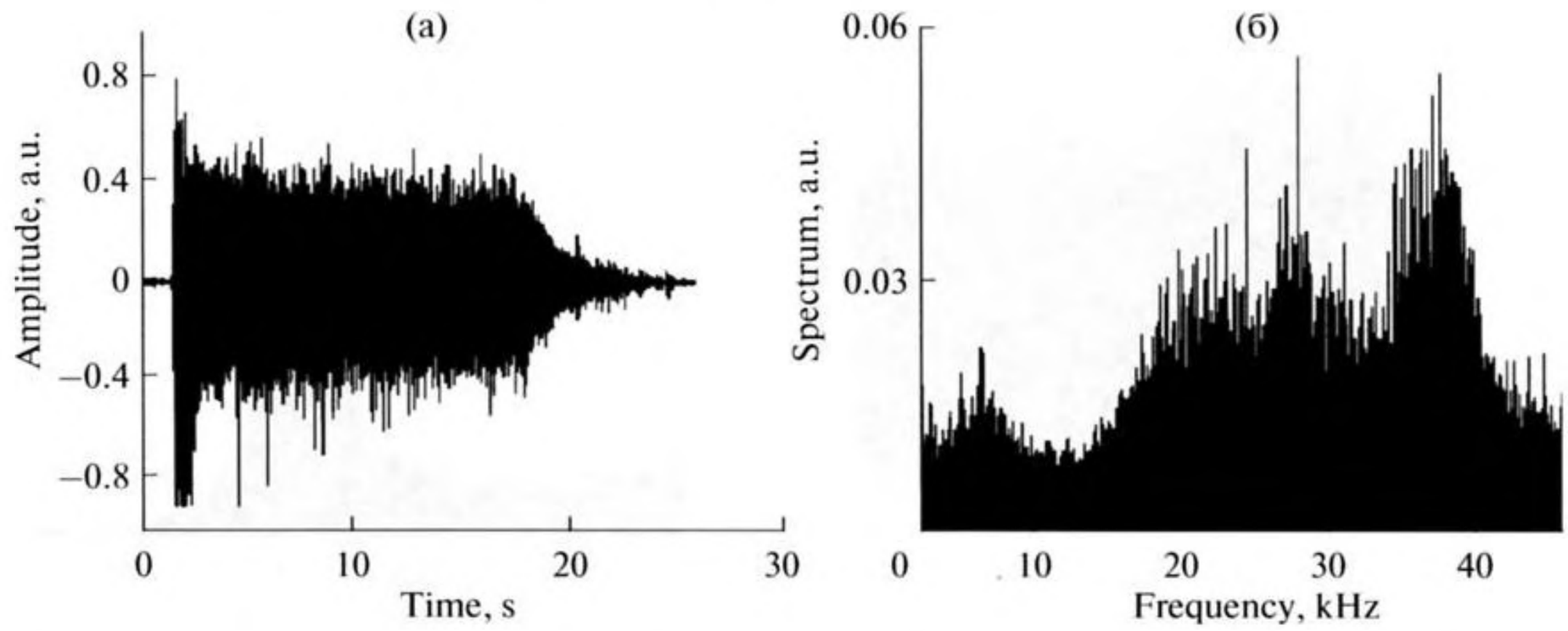

Рис. 3. Осциллограмма акустической эмиссии в стационарном и переходном режиме излучения (а), спектральная плотность мощности акустической эмиссии в стационарном режиме (б). Крупнопористый образец, в поры которого введено 0.5 мл глицерина, $\Delta p = 0.3$ МПа.

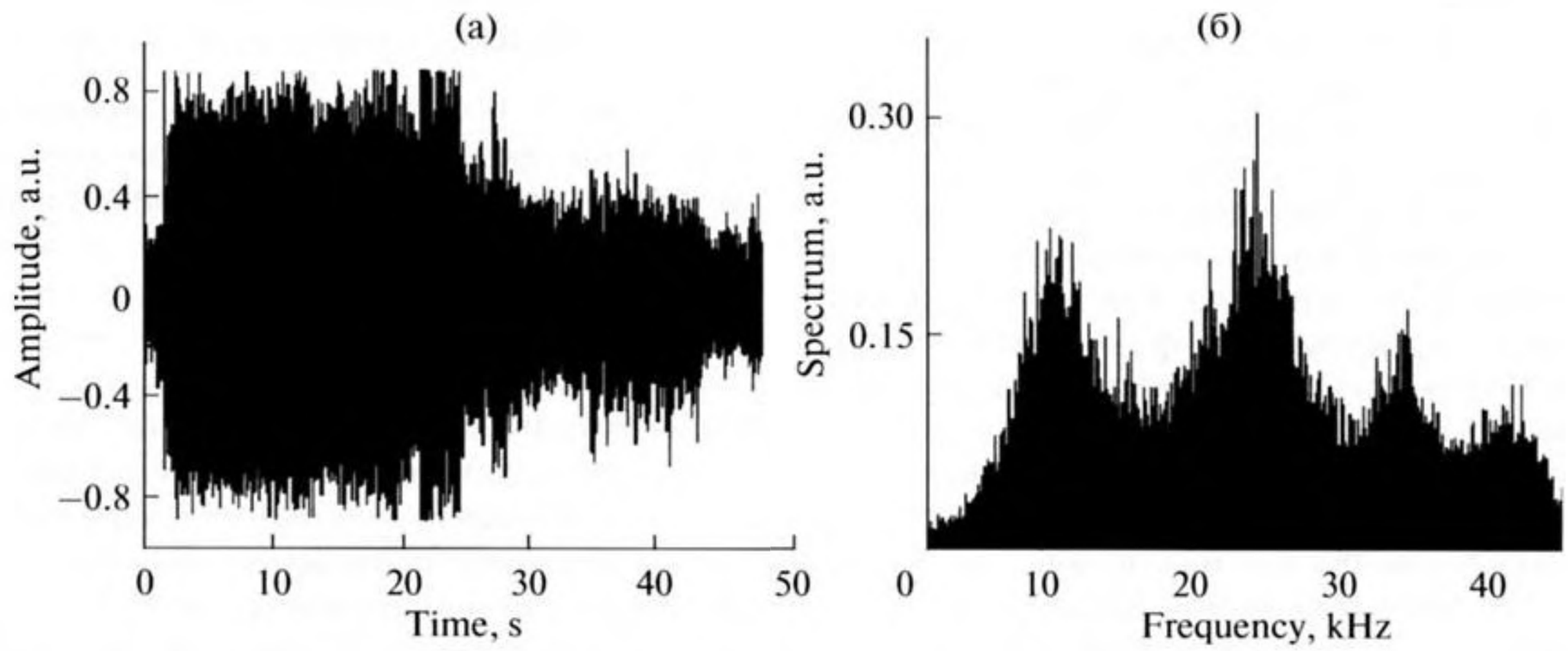

Рис. 4. Осциллограмма (а), спектр акустической эмиссии (б). Мелкопористый образец с сухими порами, $\Delta p = 0.3$ МПа.

Наиболее интенсивные максимумы в спектре шума эмиссии при стационарной фильтрации воздуха располагаются в следующем порядке: первый максимум, имеющий более высокий уровень, – в интервале частот 24–27 кГц, а второй, с меньшим уровнем, приходится на частоты 36–38 кГц. При увеличении перепада давления до значения $\Delta p = 0.36$ МПа наблюдается незначительное смещение максимумов спектра вверх по частоте на 1–2 кГц и подъем уровня, не превышающий 5–10%. Представленные данные соответствуют случаю продувки сухого образца.

На рис. 3а, 3б представлены осциллограмма и спектр эмиссии, зарегистрированные после введения в поры образца 0.5 мл глицерина. Время релаксации увеличивается до 5–6 с. Первый максимум в спектре имеет меньший уровень, чем второй, и перекрывает частотный интервал 20–30 кГц, а второй – становится доминирующим и располагается в полосе 35–39 кГц. Это наблюдается как для перепада давления на образце $\Delta p = 0.3$ МПа, так и для перепада $\Delta p = 0.36$ МПа.

Рассмотрение аналогичных характеристик акустической эмиссии, возникающей при фильтрации воздушного потока сквозь образец с мелкопористой структурой, показывает, что использование только спектральных особенностей при выработке ключевого признака при поиске и обнаружении флюида, присутствующего в порах среды, становится явно недостаточным. Это демонстрируют рис. 4а, 4б, на которых представлены осциллограмма и спектральная плотность мощности акустической эмиссии, возникающие при прокачке воздуха под действием перепада давления в 0.3 МПа через сухой мелкопористый образец. В этом случае даже в отсутствии частичного заполнения пор среды глицерином спектр эмиссии характеризуется аномально широкой

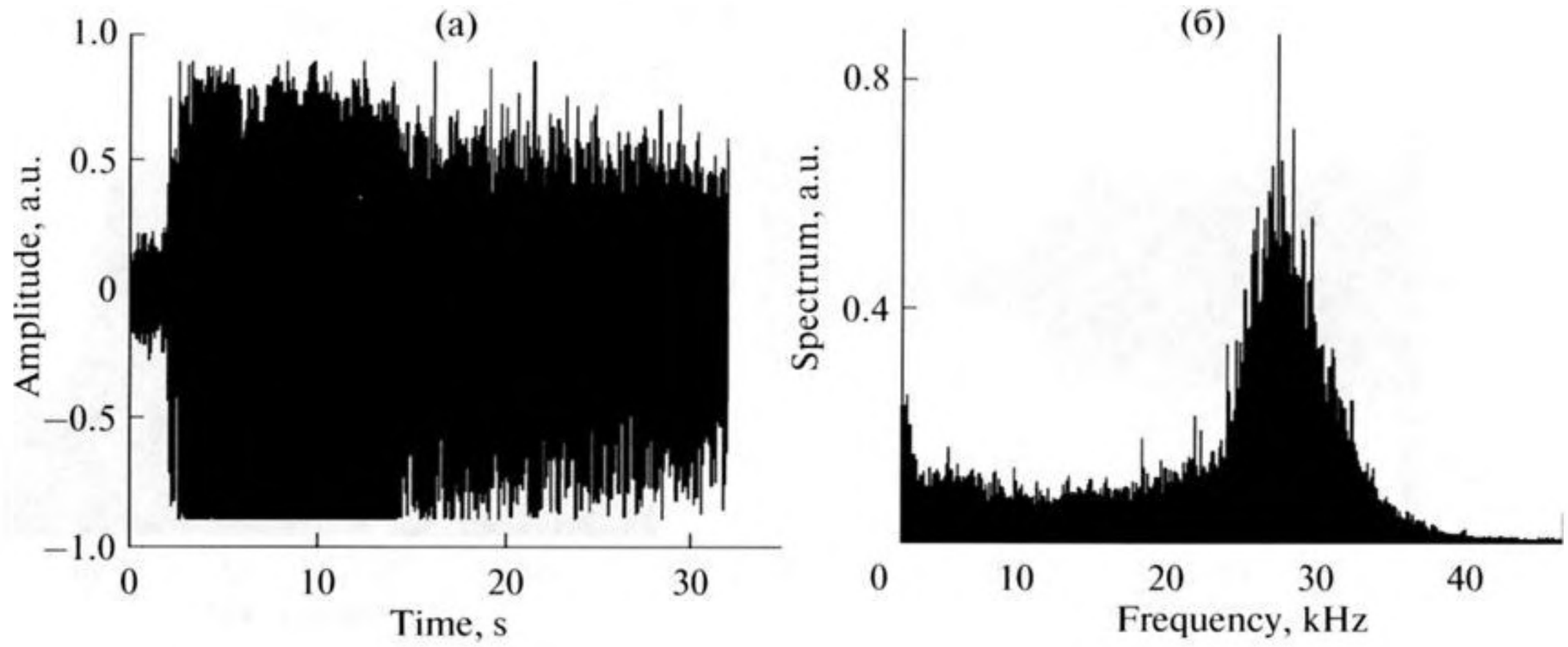

Рис. 5. Осциллограмма (а), спектр акустической эмиссии (б). Мелкопористый образец, в поры которого введено 0.5 мл глицерина, $\Delta p = 0.36$ МПа.

полосой с тремя-четырьмя максимумами на кривой огибающей. Подъемы приходятся на 10, 25, 35 и 43 кГц. Характерное значение времени спада уровня шума до уровня фона при переходном процессе акустической эмиссии составляет ~25 с. Отсюда вытекает необходимость использования указанного отличия этого параметра от аналогичного в крупнопористой структуре для надежного определения присутствия флюидозаполнения пор и для уверенной классификации типа пористой структуры. Тем самым, становится очевидной необходимость привлечения ранее указанного параметра – времени релаксации, которое фиксируется в измерениях на образце с мелкопористой структурой, как и в предыдущем случае. Этот параметр следует рассматривать как еще один важный информативный признак, сигнализирующий о возможном присутствии жидкости в порах.

На рис. 5а, 5б представлены осциллограмма и спектр акустической эмиссии, зарегистрированной после введения 0.5 мл глицерина в поры мелкопористого образца, через который под действием перепада давления $\Delta p = 0.36$ МПа фильтруется воздушный поток. В осциллограмме на рис. 5а показан промежуток только ~30 с длительности, причем полное время релаксации в этом случае достигает ~2 мин. Акустическая эмиссия характеризуется в последнем случае повышенным интегральным уровнем. На рис. 5б наблюдается единственный значительный максимум на кривой огибающей спектра, перекрывающий полосу 26–33 кГц. Четырехкратное нарастание времени переходного процесса (по сравнению с предыдущим случаем), увеличенный в 1.5–2 раза уровень спектральной плотности акустической эмиссии в полосе частот – в районе единственного максимума спектральной плотности акустического излучения – составляют совокупность признаков присутствия флюида в образце данного типа.

В связи с полученными в экспериментах результатами предлагается рассматривать в качестве признаков присутствия в пористой среде флюидозаполнения: 1) более высокий уровень эмиссии (на ~3–6 дБ); 2) более широкую полосу частот спектральной плотности акустической эмиссии в стационарном режиме и 3) возрастание длительности переходного процесса. Данные предложения из-за ограниченности объема исходных первичных данных носят качественный характер. В частности, объемное содержание флюида в порах в проведенных экспериментах не снижалось ниже 30%, а в большинстве измерений поддерживалось вблизи сравнительно высокого уровня (40–50%).

Следовательно, возможность мониторинга слабо насыщенных сред или в противоположном случае – сред, полностью насыщенных жидкостью, на основе описанного подхода в дальнейшем требует своего обоснования. Об этом свидетельствуют результаты экспериментов, которые наряду с принципиальной возможностью использования акустической эмиссии показывают необходимость проведения дальнейших исследований ее характеристик в целях получения количественных данных о степени флюидонасыщенности пористой среды. Для повышения надежности и достоверности формулируемых ниже выводов предполагается расширить типы исследуемых пористых сред, охватив более широкий класс пород по параметрам пористости, проницаемости, смачиваемости и т.д. В перспективе предполагаются более тщательные и многочисленные измерения на образцах со структурами, типичными для области недр, в которых ведется поиск залежей.

ВЫВОДЫ

При проведении лабораторных экспериментов по анализу акустической эмиссии, возникающей при фильтрации сжатого воздуха сквозь сухие пористые образцы, а также имеющие флюидозаполнение, и систематизации результатов их обработки получены данные, которые могут служить предпосылками к выработке признаков, важных для прогноза присутствия флюида в порах образцов.

Лабораторные эксперименты выполнены с использованием двух разных типов образцов пористой пемзы и глицерина. Процедура состоит в продувке пробных образцов сжатым воздухом, последующее проведение анализа и сравнения спектров акустической эмиссии, порождаемой воздушным потоком, включающее использование стационарных участков ее осциллограмм, а также оценку времени релаксации. Признаками частичной насыщенности пористого образца флюидом являются: подъем уровня эмиссионного шума (в 1.5 раза); расширение полосы спектра акустической эмиссии в обе стороны по частоте и двукратное (и более) увеличение времени спада уровня эмиссии до уровня фона ~40–50 дБ при резком снятии перепада давления.

Таким образом, показана принципиальная возможность применения явления акустической эмиссии для мониторинга присутствия жидкости в пористых образцах, но для большей детализации количественных показателей флюидозаполнения порового пространства необходимо дальнейшее более подробное и тщательное исследование ее характеристик. В дальнейших исследованиях предполагается привлечение более широкого статистического материала, с учетом многообразия видов поровых жидкостей и твердого скелета, характерного для пород с различной морфологией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баранов В.М.* Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоиздат, 1990.
2. *Алиев А.Е., Саидов А.А., Хабибуллаев П.К., Шиндер И.И.* Релаксационные процессы и диагностика фазовых состояний в консолидированной среде // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 3. С. 279.
3. *Алейников А.Л., Беликов В.Т., Немзоров Н.И.* Акустическая эмиссия в гетерогенных средах // Дефектоскопия. 1999. № 3. С. 31–36.
4. *Лавров А.В.* Пространственная локализация разрушения как причина вариаций амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 3. С. 321–327.
5. *Лавров А.В., Шкуратник В.Л.* Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 5. С. 6–18.
6. *Николаевский В.Н.* Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 232 с.
7. *Дрягин В.В., Кузнецов О.Л., Стародубцев А.А., Рок В.Е.* Поиск углеводородов методом вызванной сейсмоакустической эмиссии в скважинах // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 5. С. 66–73.
8. *Алейников А.Л., Беликов В.Т., Немзоров Н.И., Троянов А.К.* Интерпретация наблюдений сигналов акустической эмиссии на уральской сверхглубокой скважине // Геология и геофизика. 1992. № 6. С. 118–126.
9. *Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В.* Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 11. С. 72–77.
10. *Ипатов А.И., Городнов А.В., Ипатов С.И., Марьенко Н.Н., Петров Л.П., Скопинцев С.П.* Исследование амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в порах // Геофизика. 2004. № 2. С. 25–30.
11. *Афанасьев Е.Ф. и др.* Контроль за разработкой месторождений акустическим способом. Обзор ВНИИЭгазпром, 1987.
12. *Коротаев Ю.П. и др.* Исследование газовых скважин с помощью шумометрии. Обзор ВНИИЭгазпром, 1983.
13. *McKinley R.M., Bower E.M., Rumble R.C.* The structure and interpretation of noise from flow behind cemented casing. SPE N3999: JPT. 1973. № 3. С. 329–338.
14. *Заславский Ю.М.* К теории акустической эмиссии при фильтрации газа частично флюидонасыщенной средой // Техн. акуст. 2005. № 5 – ta.org.ru