

РУБРИКА: ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТОВЫХ СИСТЕМ

Исследование фильтрационных свойств карбонатных коллекторов и спектральных характеристик акустической эмиссии при течении в них газа

Е.А. Марфин (ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казанский федеральный университет),
Р.А. Натфуллин (Казанский федеральный университет)

Аннотация

В работе представлены результаты лабораторных исследований, направленных на изучение связи спектральных характеристик акустической эмиссии с фильтрационно-емкостными свойствами карбонатных коллекторов нефтяных месторождений Республики Татарстан. Эксперименты проводились на специально разработанной установке, позволяющей регистрировать акустическую эмиссию при стационарных и нестационарных режимах фильтрации газа. Установлено, что спектры акустической эмиссии карбонатных коллекторов имеют выраженные частотные пики, обусловленные их трещиноватостью, и отличаются от спектров терригенных коллекторов. Показано, что изменение перепада давления приводит к вариациям интенсивности и частотных характеристик акустической эмиссии, что подтверждает ключевую роль трещин в генерации фильтрационных шумов. Интенсивность шумов демонстрирует квадратичную зависимость от перепада давления, отражая сложную структуру порового пространства. Полученные результаты имеют важное значение для разработки методов акустической диагностики коллекторов, оптимизации процессов фильтрации и повышения эффективности добычи углеводородов.

Ключевые слова: акустическая эмиссия; карбонатные коллекторы; фильтрация газа; спектральный анализ; трещиноватость пород; проницаемость

Study of filtration properties of carbonate reservoirs and spectral characteristics of acoustic emission during gas flow in them

E.A. Marfin (FRC Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Kazan Federal University), R.A. Natfullin (Kazan Federal University)

Abstract

The paper presents the findings of laboratory research conducted with the aim of studying the relationship between spectral characteristics of acoustic emission and filtration-capacitance properties of carbonate reservoirs of oil fields in the Republic of Tatarstan. The experiments were conducted on a bespoke apparatus that facilitated the registration of acoustic emission in both stationary and non-stationary modes of gas filtration. It was determined that the acoustic emission spectra of carbonate reservoirs exhibit pronounced frequency peaks due to their fracturing, and differ from the spectra of terrigenous reservoirs. The present study demonstrates that fluctuations in pressure drop result in alterations to the intensity and frequency characteristics of acoustic emission, thereby substantiating the pivotal function of fractures in the generation of filtration noises. The noise intensity exhibited a quadratic dependence on the pressure drop, indicative of the intricate nature of the pore space. The results obtained are of great significance for the development of methods of acoustic diagnostics of reservoirs, optimization of filtration processes and improvement of hydrocarbon production efficiency.

Key words: acoustic emission; carbonate reservoirs; gas filtration; spectral analysis; rock fracturing; permeability

Введение

Акустические волны находят широкое применение в геофизике, как для исследования геологических сред, так и для целенаправленного воздействия на них. Одним из подобных методов является анализ акустической эмиссии (АЭ) – процесса генерации звуковых колебаний в твердых телах при их деформации или в результате физико-химических превращений [1, 2]. В природных условиях АЭ служит индикатором различных динамических процессов: она предшествует катастрофическим событиям, включая землетрясения и оползни [3], а также возникает при фильтрации жидкостей и газов в пористых породах нефтегазовых месторождений [4]. Фильтрация флюида через породу создает дополнительные напряжения, влияя на спектральные характеристики акустических сигналов, что позволяет определять зоны интенсивной фильтрации, структурные особенности породы и свойства флюида. Существуют различные модели звукообразования, от классических гидродинамических до современных, описывающих генерацию акустического шума в пористых средах.

Исторически первой была теория генерации звука при обтекании объектов потоком жидкости или газа, разработанная Рэлеем в 1877 году [5] и развитая Лайтхиллом в 1950-е годы [6], который предложил метод акустических аналогий для описания шума турбулентных потоков. Кёрл [7] расширил эту модель, включив влияние жестких границ. Основу теории гидродинамического звукообразования составляет неоднородное волновое уравнение Лайтхилла–Кёрла, связывающее акустическое излучение с турбулентными пульсациями и напряжениями в потоке. Решение уравнения включает три типа источников: квадрупольные (объемные турбулентные возмущения), дипольные (взаимодействие потока с поверхностями) и монопольные (пульсации расхода). Применительно к пористым средам, аналогичный подход показал, что звук генерируется дипольными и квадрупольными источниками, а в ограниченных средах могут возникать и монопольные [8].

Авторы работы [9] связывают генерацию акустических волн при фильтрации с образованием микровихрей вблизи шероховатых поверхностей частиц кварца, что приводит к пульсациям давления и колебаниям частиц. Эти колебания, в свою очередь, генерируют акустический шум. Интенсивность такого шума определяется суперпозицией вкладов от каждой колеблющейся частицы. Модель предсказывает, что амплитуда колебаний зависит от градиента давления и проницаемости, но не от свойств флюида, а спектральная плотность шума связана с проницаемостью, пористостью и градиентом давления. В работе [10] изучается генерация акустических шумов при фильтрации флюидов через пористые среды и микротрещины. Эксперименты показали, что звукообразование связано с прерывистым движением флюида из-за сужений пор и турбулентностью в крупных порах. Показано, что спектры акустической эмиссии (1–30 кГц, наиболее информативно 5–15 кГц) зависят от геометрии поровых каналов и расхода флюида, но положение максимумов не изменяется с ростом скорости потока. Увеличение проницаемости смещает пик спектра в низкочастотную область. Моделирование заколонных перетоков газа и воды подтвердило, что шероховатость поверхности расширяет спектр, а частотные максимумы обратно пропорциональны размерам пор и каналов.

В работе [11] ее авторы выделяют два ключевых процесса: турбулизацию потока и пульсационное течение, вызванное периодическим раскрытием-схлопыванием сужений в порах. Предложена модель, где движение флюида происходит порциями при превышении критического перепада давления. Эксперименты и ртутная порозиметрия позволили установить эмпирическую связь между частотой максимума шума (f), подвижностью флюида (ξ) и эффективным диаметром пор (D): $f \sim \xi^n D^{-p}$. Однако размерностный анализ выявил противоречия, требующие уточнения. Численное моделирование воспроизвело спектры, схожие с экспериментальными, но универсальность параметров модели не доказана. Несмотря на интересные результаты, сравнение спектров акустических шумов с распределением пор по размерам неоднозначно и требует дополнительных исследований. Предложенная эмпирическая зависимость недостаточно обоснована физически, а численная модель нуждается в верификации

на образцах в широком диапазоне фильтрационных свойств. Тем не менее, работа подтверждает, что акустические сигналы несут информацию о структуре порового пространства и динамике фильтрации, что может быть полезно для диагностики коллекторов.

Воздействие внешних или внутренних сил на горную породу приводит к росту структурных напряжений, деформациям и образованию микротрещин, что сопровождается акустической эмиссией. Спектр АЭ зависит от характера и размера трещин, что позволяет изучать структурные свойства породы [12]. Аналогичные процессы возникают при изменении пластового давления во время закачки или добычи флюидов, когда градиенты давления вызывают перераспределение напряжений в скелете породы. Эксперименты показывают [13], что АЭ может использоваться для определения типа флюида в коллекторе. Например, высокочастотные шумы (0,5–2,5 кГц) характерны для нефте- и газонасыщенных пластов, тогда как низкочастотные (100–500 Гц) — для водоносных. Вибрационное воздействие на пласт в низкочастотном диапазоне (8–15 Гц) генерирует вторичные высокочастотные сигналы (10–20 кГц), что может помочь в анализе распределения флюидов и оптимизации разработки месторождений [4]. Таким образом, акустическая эмиссия служит ценным инструментом для мониторинга состояния пласта и его насыщенности.

В работах [14, 15] предлагается рассматривать поровое пространство горных пород как совокупность резонаторов Гельмгольца, где акустический шум генерируется микровихрями, возникающими при течении газа. Хотя спектр шума широкий, усиливаются преимущественно частоты, соответствующие собственным частотам поровых полостей. Расчеты для типичных параметров (радиус поры $\sim 10^{-4}$ м, горловины $\sim 10^{-5}$ м) показывают резонансные частоты около 7 кГц, что согласуется с экспериментальными данными. Однако точное соответствие геометрии реальных поровых каналов требует уточнения, особенно при учете взаимодействия множества резонаторов. Исследования выявили зависимость частотного спектра от распределения пор по размерам: увеличение доли крупных пор смещает максимумы в низкочастотную область, а мелких — в высокочастотную. Большинство резонансных частот ансамбля пор попадает в диапазон 5–20 кГц. Численное моделирование в COMSOL Multiphysics подтвердило образование микровихрей даже при малых числах Рейнольдса ($Re \sim 1-10$), характерных для призабойной зоны газовых скважин. Это подчеркивает роль геометрии порового пространства в формировании акустического отклика при фильтрации.

Из-за отсутствия единой теории звукообразования при фильтрации флюидов, ряд исследований сосредоточен на накоплении экспериментальных данных. Работы [16, 17] выявили, что шумы фильтрации (1–25 кГц) зависят от типа коллектора: для трещиноватых пород характерен диапазон 1–8 кГц, для песчаников — 3–30 кГц. При этом частота экстремумов в спектре связана с размером гранул породы, а тип флюида и скорость фильтрации не влияют на частотное положение максимумов. Лабораторные эксперименты [18] с природными пористыми средами (известняки, песчаники) подтвердили, что спектральные характеристики определяются структурой порового пространства. Например, известняк Индиана демонстрирует широкий спектр с максимумами на 1, 4, 7 и 12 кГц, тогда как песчаник Баффало Береа — узкий диапазон 1–5 кГц. Обнаружено, что шум возникает только при превышении числа Форхгеймера 0,1–0,3, а гетерогенные породы генерируют более интенсивные сигналы. Некоторые выводы, например о связи размера гранул и частоты шумов, противоречат данным других исследований [11], что подчеркивает необходимость дальнейших экспериментов. Тем не менее, накопленные данные важны для разработки будущих моделей, особенно в части влияния микроструктуры породы на акустический отклик.

Заслуживает внимания модель генерации шума в пористой среде при фильтрации флюида, представленная в работе Лебедева [19], которая заключается в возникновении релаксационных автоколебаний, обусловленных наличием структурных элементов среды с гистерезисом адгезии. В модели предполагается, что нестационарность потока флюида вызвана периодическим открытием и закрытием микроскопических каналов (трещин) между зернами пористой среды.

под действием давления. Это приводит к выбросам порций флюида, которые генерируют акустическое излучение. Частотные характеристики шума определяются параметрами среды, такими как размер зерен, проницаемость и жесткость полостей, а также свойствами флюида. Данная модель объясняет спектры экспериментально наблюдаемых шумов [20, 21] даже при малых числах Рейнольдса, где турбулентность отсутствует, и согласуется с измерениями, предоставляя основу для диагностики пористых сред по акустическим данным.

Упругие колебания, генерируемые фильтрационными шумами, распространяются от источников к датчику, регистрирующие АЭ. При этом процесс распространения упругих волн в насыщенных пористых средах несколько отличается от распространения волн в жидкостях, газах и твердых телах [22]. Теория Френкеля-Био-Николаевского [23, 24, 25] описывает этот процесс, предсказывая три типа волн: быструю продольную (1-го рода), медленную продольную (2-го рода, или волну Био) и поперечную. Быстрая волна характеризуется синфазным движением скелета и флюида, а медленная – их противофазным движением. Экспериментально подтверждено, что скорость медленной волны снижается с уменьшением пористости, в отличие от быстрой и поперечной. В водонасыщенных средах медленная волна существует на высоких частотах, тогда как в газонасыщенных её влияние более заметно. Затухание волны 1-го рода значительно меньше, чем у волны 2-го рода, поэтому на большие расстояния распространяется преимущественно первая. На параметры волн также влияет теплообмен между скелетом и флюидом. Теория Френкеля-Био-Николаевского и модели фильтрационного звукообразования дополняют друг друга, объясняя акустические явления в пористых средах. Первая описывает распространение волн, вторая – механизмы их генерации при фильтрации. Оба подхода подчеркивают важность структурных свойств породы и параметров потока флюида для интерпретации акустических сигналов.

Анализ существующих моделей звукообразования при фильтрации флюидов через пористые среды позволил выделить установленные факты (генерация акустических волн в диапазоне 2-20 кГц, зависимость спектральных характеристик от геометрии поровых каналов и влияние скорости фильтрации на интенсивность шумов), а также ряд гипотез, требующих дополнительной проверки (связь спектра с распределением пор по размерам, зависимость от перепада давления, возникновение турбулентности при малых числах Рейнольдса). Тем не менее, в настоящее время отсутствует единая физическая модель этого процесса, а существующие математические описания содержат эмпирические коэффициенты, что ограничивает их прогностическую способность. В связи с этим особую актуальность приобретают экспериментальные исследования, направленные на получение достоверных данных для разработки универсальной теории фильтрационного звукообразования, которая могла бы найти практическое применение при диагностике коллекторов. Цель настоящей работы – экспериментальное исследование спектральных характеристик фильтрационных шумов в карбонатных коллекторах при различных режимах течения.

Метод и объекты исследования

Объектами настоящего исследования являлись образцы карбонатных коллекторов, отобранные с нефтяных месторождений Республики Татарстан. Выбор именно карбонатных пород обусловлен их широкой распространенностью в регионе, а также характерными геологическими и петрофизическими особенностями, определяющими их низкую нефтеотдачу. В отличие от более проницаемых терригенных коллекторов [26], карбонатные пласты характеризуются крайне сложным порово-трещинным строением: они имеют низкую пористость, выраженную микротрещиноватость, а также значительную неоднородность в распределении порового пространства [27]. Это затрудняет моделировать процессы фильтрации и существенно снижает эффективность традиционных методов добычи углеводородов. Настоящее исследование фильтрационных характеристик таких пород, а также сопутствующих акустических эффектов, представляет особый интерес в том числе и для задач повышения нефтеотдачи пластов [28].

Часть лабораторных исследований кернов проводилась в Казанском федеральном университете. Для оценки фильтрационно-емкостных свойств исследуемых образцов использовался автоматизированный анализатор газопроницаемости и пористости ПИК-ПП (производства АО «Геологика»). Измерения проводились в соответствии с принятой методикой, включающей предварительную подготовку образцов, контроль условий насыщения, температуры и давления. Полученные значения пористости и проницаемости служили основой для последующего сопоставления с результатами, полученными в ходе акустических экспериментов.

Изучение спектральных характеристик акустической эмиссии при фильтрации газа осуществлялось с использованием специально разработанной экспериментальной установки, схема которой представлена на рисунке 1. В основе метода лежит регистрация акустических сигналов, возникающих при прохождении потока воздуха через пористую среду. Образец карбонатной породы (поз. 1) размещался в герметичной манжете - кернодержателе. Газ подавался из ресивера объемом 50 л (поз. 2), который заполнялся сжатым воздухом при давлении до 1 МПа с помощью компрессора. Регулирование давления на входе в образец осуществлялось посредством механического регулятора (поз. 3), обеспечивающего как стационарные, так и нестационарные режимы фильтрации.

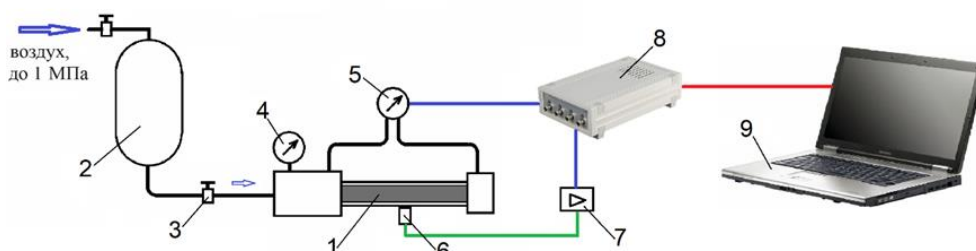


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки.

В процессе фильтрации акустическая эмиссия регистрировалась с помощью контактного микрофона (поз. 6), установленного на поверхности кернодержателя, в котором находился образец. Сигналы от микрофона усиливались (усилитель – поз. 7), поступали на спектральный анализатор ZET-017-U4 (поз. 8), а затем записывались на персональный компьютер (поз. 9) для последующей обработки. Параллельно производилась регистрация давления до образца с помощью тензометрического датчика давления (поз. 5). Таким образом, обеспечивалась синхронная запись как акустических, так и гидродинамических параметров.

Особенностью данной установки является возможность реализации нестационарного режима фильтрации, что позволяет получать более полную информацию о проницаемости образца и его реакции на изменяющийся градиент давления. Методика проведения нестационарного эксперимента включала следующую последовательность операций: при установленном начальном давлении в ресивере перекрывался входной вентиль, а регулятор давления полностью открывался, создавая условия свободного истечения газа через образец. При этом давление в ресивере и перед образцом начинало снижаться. Фиксация этой динамики осуществлялась в реальном времени. Пример типичной кривой падения давления для малого объема ресивера (78 см³) и образца с проницаемостью 101,8 мД представлен на рисунке 2. Дальнейшая обработка данных проводилась с использованием уравнений фильтрации газа, основанных на законе Дарси с поправками на сжимаемость. Расчет проницаемости осуществлялся путем аппроксимации экспериментальных кривых теоретической моделью.

Для верификации разработанной методики были проведены сопоставительные измерения проницаемости на анализаторе ПИК-ПП. Расхождение между результатами не превышало 3%, что укладывается в пределы инструментальной погрешности и подтверждает надежность

предложенного подхода. Это позволяет использовать акустико-гидродинамическую установку не только для регистрации шумов, но и для оперативной оценки фильтрационных характеристик пористых образцов.

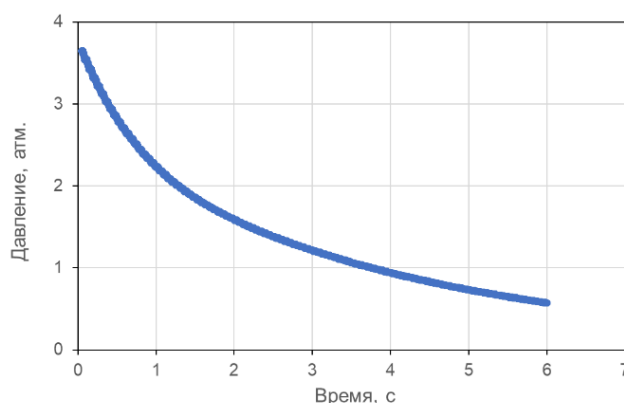


Рисунок 2. Кривая падения давления перед образцом.

Результаты

В рамках настоящего исследования были проведены комплексные лабораторные эксперименты по изучению спектральных характеристик АЭ, возникающей при фильтрации газа через образцы карбонатных коллекторов. Всего было исследовано пять кернов, отобранных из различных участков нефтяных месторождений Республики Татарстан. Проницаемость образцов варьировалась от 0,1 до 2 Дарси. Акустические измерения осуществлялись как в стационарном, так и в нестационарном режимах фильтрации, что позволило зафиксировать широкий спектр реакций пористой среды на изменяющиеся градиенты давления. Во всех образцах регистрировались устойчивые акустические сигналы, обусловленные микродеформациями и взаимодействием газа с элементами порово-трещинной структуры. Спектры АЭ отличались индивидуальностью, что указывает на чувствительность метода к микроструктуре породы. Наиболее характерные спектры, полученные при различных перепадах давления, представлены на рисунке 3. Проведённая цифровая фильтрация позволила устранить паразитные компоненты, связанные с техническими шумами оборудования.

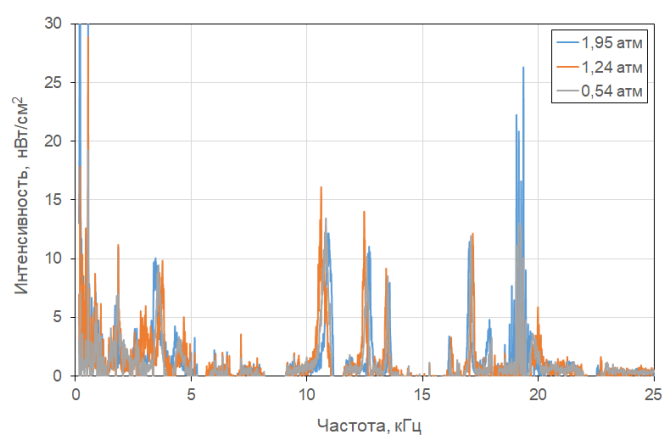


Рисунок 3. Спектры АЭ пористого образца для различных перепадов давления.

Анализ спектров показал наличие выраженных частотных пиков в диапазоне 11–19 кГц, при этом положение и амплитуда пиков изменялись в зависимости от градиента давления. Подобные устойчивые частотные составляющие ранее наблюдались в ряде работ [11, 17, 21], где спектры АЭ также демонстрировали соответствие с геометрией пор и трещин. Однако в нашем случае было установлено, что карбонатные породы характеризуются более выраженной резонансной

структурой спектра по сравнению с терригенными коллекторами, что подтверждается выводами [17, 18]. В последнем отмечалось, что спектры песчаников шире и менее структурированы (частотный диапазон 3–30 кГц), в то время как трещиноватые карбонаты генерируют более узкие и чёткие пики, преимущественно в области до 20 кГц.

Особое внимание было уделено влиянию перепада давления на параметры спектра. С увеличением давления (до 1,24 атм) наблюдалось возрастание амплитуды пиков на 11 и 13 кГц, в то время как амплитуда пика на 19 кГц снижалась. Это согласуется с моделью акустических резонаторов Гельмгольца, предложенной в [14, 15], согласно которой трещины с различной геометрией и ориентацией реагируют по-разному на изменение механической нагрузки.

Квадратичная зависимость интенсивности АЭ от давления (Рис. 4) согласуется с моделью активации трещин [10]. Подобная нелинейная связь, описанная ранее в [10], указывает на активацию дополнительных источников акустического излучения – в частности, микротрещин, ранее не вовлечённых в фильтрационный процесс при меньших градиентах. Микрофотографии подобных структур в кернах представлены на рисунке 5 из работы [29]. Однако, в отличие от работы [10], в которых наблюдалось насыщение интенсивности на высоких давлениях, в настоящем исследовании рост продолжался вплоть до верхнего порога испытаний, что, возможно, связано с большей трещиноватостью исследованных образцов.

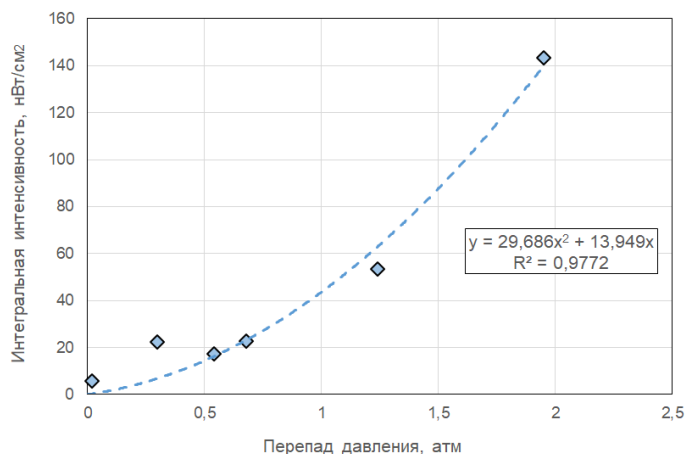


Рисунок 4. Зависимость интенсивности АЭ от перепада давления.

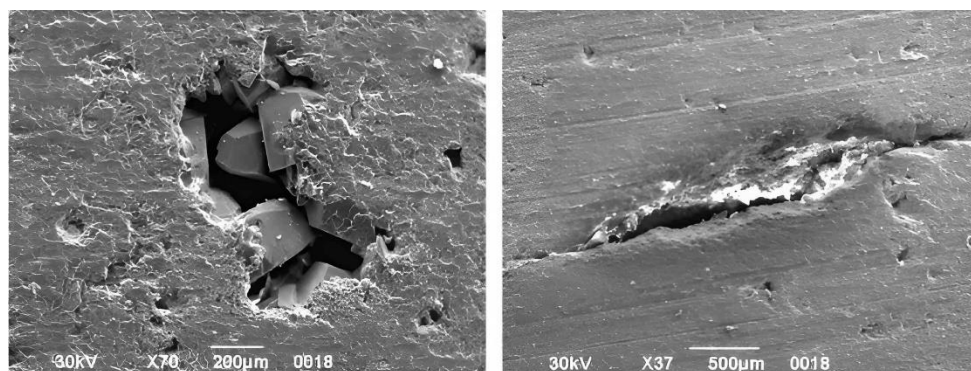


Рисунок 5. Электронная микрофотография карбонатного образца [29].

Также было установлено, что амплитуды и добротность частотных пиков в спектрах АЭ чувствительны к ориентации и раскрытию трещин, что ранее описывалось в рамках механики разрушения [1-2]. При этом наша установка позволила впервые зафиксировать динамические изменения спектра АЭ в реальном времени при нестационарной фильтрации, что представляет собой методическое новшество по сравнению с более ранними статичными измерениями.

Сравнение с данными численного моделирования, представленными в работах [15, 20, 30], показывает качественное совпадение положения спектральных максимумов, однако количественные различия в ширине пиков и амплитудных соотношениях свидетельствуют о необходимости дальнейшей верификации численных моделей на натуральных образцах с реальной трещиноватостью.

Выводы

В рамках исследования были изучены карбонатные породы из нефтяных месторождений Татарстана, через которые пропускаться газ. Основное внимание уделялось акустическим шумам, возникающим при фильтрации – их спектру и интенсивности. Создана установка, позволяющая одновременно измерять проницаемость породы и регистрировать возникающие акустические сигналы. Метод оказался точным и воспроизводимым (ошибка <3%). Спектры АЭ карбонатных коллекторов демонстрируют четкие пики в диапазоне 11–19 кГц (Рис. 3), соответствующие резонансным частотам трещин шириной 10–50 мкм, рассчитанным по модели Гельмгольца. Квадратичный рост интенсивности АЭ с давлением (Рис. 4) подтверждает активацию дополнительных трещин при $\Delta P > 0,5$ атм. В отличие от терригенных пород [21], карбонаты проявляют структурную чувствительность к давлению, что позволяет использовать АЭ для оценки трещиноватости с погрешностью $\pm 5\%$. Дальнейшие исследования будут направлены на корреляцию спектров АЭ с рентген-томографией трещин. Метод акустической эмиссии позволяет оценить структуру и состояние породы без её разрушения. Он чувствителен к ориентации трещин, их размерам и динамике изменения при разных условиях. Полученные данные подтверждают высокую эффективность акустических методов для диагностики сложных коллекторов и могут использоваться при бурении и добыче нефти для повышения её извлекаемости.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (соглашение №71/2024-ПД).

Список литературы

1. Gholizadeh S. A review of the application of acoustic emission technique in engineering / S. Gholizadeh, Z. Lemana, B.T.H.T. Baharudinb // Structural Engineering and Mechanics. – 2015. – Vol. 54. – Is. 6. – P. 1075-1095. – DOI: 10.12989/sem.2015.54.6.1075 – URL: <https://doi.org/10.12989/sem.2015.54.6.1075>
2. Grosse C. E. Acoustic Emission Testing / C. E. Grosse, M. Ohtsu // Springer, Berlin, Heidelberg. – 2008. 396 p. – DOI: 10.1007/978-3-540-69972-9 – URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9>
3. Michlmayr, G., Cohen D. and Or D. [2012] Sources and characteristics of acoustic emissions from mechanically stressed geologic granular media - A review / G. Michlmayr, D. Cohen, D. Or // Earth-Science Reviews, – 2012. – Vol. 112. – Is. 3-4. – P. 97-114. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.02.009 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.009>
4. Dryagin, V. V. Seismoacoustic emission of an oil-producing bed / V. V. Dryagin // Acoustical Physics. – 2013. – Vol. 59, No. 6. – P. 694-701. – DOI: 10.1134/S1063771013050060. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063771013050060>

5. Дж. В. Стретт (лорд Релей) Теория звука в 2-х т. / Дж. В. Стретт // – М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит.-ры. – 1955. – 504 с.
6. Lighthill, M. J. On sound generated aerodynamically. I. General theory / M. J. Lighthill // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1952. – Vol. 211. – Iss. 1107. – P. 564–587. – DOI: 10.1098/rspa.1952.0060. – URL: <https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0060>
7. Curle, N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound / N. Curle // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1955. – Vol. 231. – P. 505–514. – DOI: 10.1098/rspa.1955.0191. – URL: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1955.0191>
8. Афанасьев, Е. Ф. Об источниках генерации звука в насыщенных флюидом пористых средах / Е. Ф. Афанасьев, К. Л. Грдзелова, Д. В. Плющев // Доклады АН СССР. – 1987. – №3. – С. 554–557.
9. Овчинников, М. Н. Механизм звукообразования при фильтрации в пористых средах / М. Н. Овчинников, А. Ю. Завидонов // Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования. – М.: Академия наук о Земле, 2002. – Т.3. – С. 135–136.
10. Ипатов, А. И. Аprobация метода анализа амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при оценке фильтрации флюидов в породах / А. И. Ипатов, А. В. Городнов, Л. П. Петров // АИС «Каротажник». – 2004. – №122. – С. 51–66.
11. Ипатов, А. И. Исследования амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах / А. И. Ипатов, А. В. Городнов, [и др.] // Геофизика. – 2004. – №2. – С. 25–30.
12. Belikov, V.T. Modeling of acoustic-emission processes in a solid / V.T. Belikov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2008. – Vol. 44. № 6. – P. 429–435. – DOI: 10.1134/S1061830908060090. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1061830908060090>
13. Dryagin, V. V. Search for hydrocarbons by the method of induced seismoacoustic emission in wells / V. V. Dryagin, A. A. Starodubtsev, [et al.] // Acoustical Physics. – 2005. – Vol. 51. – P. S54–S60. – DOI: 10.1134/1.2133953 – URL: <https://doi.org/10.1134/1.2133953>
14. Иванова, Э.А. Резонансы внутри ансамбля пор как возможная модель формирования спектра акустического излучения при фильтрации газа через пористые среды / Иванова Э.А., Михайлов Д.Н. // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2017. – №5. – С. 1750805.
15. Mikhailov, D. N. Modeling the Spectral Features of Acoustic Noise Produced by Gas Flow in Rock Samples Based on the Theory of Ensemble of Interconnected Pore Resonators / D. N. Mikhailov, E. A. Ivanova // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2019. – Vol. 55, No. 3. – P. 509–516. – DOI 10.1134/S1069351319030054. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1069351319030054>
16. Nikolaev, S. A. Spectral sound-generation of filtration flow in injection wells / S. A. Nikolaev, M. N. Ovchinnikov, G. F. Kandaurova // Neftyanoe Khozyaistvo. – 1992. – №2. – P. 40–42.
17. Николаев, С. А. Генерация звука фильтрационным потоком в пористых средах / С. А. Николаев, М. Н. Овчинников // Акустический журнал. – 1992. – Т. 38. № 1. – С. 114–118.
18. Sergeev, S. I. Laboratory investigation of sound induced by gas flow in porous media / S. I. Sergeev, N. I. Ryzhikov, D. N. Mikhailov // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. V. 172. P. 654–661. – DOI: 10.1016/j.petrol.2018.08.018 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.018>
19. Лебедев, А. В. Нелинейный релаксационный механизм генерации шума фильтрации в пористых средах / А. В. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2018. – Т. 61, № 4. – С. 343–357.
20. Лебедев, А. В. Сравнение теории с результатами измерений шума фильтрации флюида в пористой среде / А. В. Лебедев // Акустический журнал. – 2022. – Т. 68, № 5. – С. 530–542. – DOI: 10.31857/S0320791922040062. – URL: <https://doi.org/10.31857/S0320791922040062>

21. Метелев, И. С. Исследование акустических шумов при фильтрации газа через пористую среду / И. С. Метелев, М. Н. Овчинников, [и др.] // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65, № 2. – С. 214-222. – DOI: 10.1134/S0320791919020096. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0320791919020096>
22. Марков, М. Г. Распространение упругих продольных волн в насыщенной пористой среде со сферическими неоднородностями / М. Г. Марков // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. Приложение. – С. 132-139.
23. Френкель, Я.И. К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений во влажной почве / Я.И. Френкель // Известия АН СССР, сер. геогр. и геоф. – 1944. – Т.8, №4. – С.133-149.
24. Biot, M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid – saturated porous solid, I: Low frequency range // Journal of the Acoustical Society of America – 1956. – V. 28, №2. – P.168-191. – DOI: 10.1121/1.1908239 – URL: <https://doi.org/10.1121/1.1908239>
25. Николаевский, В. Н. Механика насыщенный пористы сред / В. Н. Николаевский, К. С. Басниев, [и др.] – М: Недра, 1970. – 339 с.
26. Иголкина, Г. В. Изучение акустических эмиссионных процессов пластов-коллекторов терригенного типа / Г. В. Иголкина, В. В. Дрягин, З. С. Мезенина // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16, № 5. – С. 14-23. – DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-14-23 – URL: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2018-5-14-23>
27. Лебедев, А. В. Экспериментальное исследование медленной релаксации скорости звука в карбонатной горной породе / А. В. Лебедев, С. А. Манаков // Акустический журнал. – 2024. – Т. 70, № 2. – С. 253-272. – DOI 10.31857/S0320791924020138 – URL: <https://doi.org/10.31857/S0320791924020138>
28. Marfin, E.A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator / E.A. Marfin, R.N. Gataullin, A.A. Abdrashitov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 215. – P. 110705. – DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110705 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110705>
29. Martyushev, D. A. Study of void space structure and its influence on carbonate reservoir properties: X-ray microtomography, electron microscopy, and well testing / D. A. Martyushev, I. N. Ponomareva, [at al] // Marine and Petroleum Geology. – 2023. – Vol. 151. – P. 106192. – DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106192 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106192>
30. Мутовкин, Н. В. Моделирование акустических полей, генерируемых фильтрационным потоком в околоскважинной зоне / Н. В. Мутовкин, Д. Н. Михайлов, И. Л. Софронов // Математическое моделирование. – 2019. – Т. 31, № 6. – С. 95-106. – DOI: 10.1134/S0234087919060066. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0234087919060066>

References

1. Gholizadeh S. A review of the application of acoustic emission technique in engineering / S. Gholizadeh, Z. Lemana, B.T.H.T. Baharudinb // Structural Engineering and Mechanics. – 2015. – Vol. 54. – Is. 6. – P. 1075-1095. – DOI: 10.12989/sem.2015.54.6.1075 – URL: <https://doi.org/10.12989/sem.2015.54.6.1075>
2. Grosse C. E. Acoustic Emission Testing / C. E. Grosse, M. Ohtsu // Springer, Berlin, Heidelberg. – 2008. 396 p. – DOI: 10.1007/978-3-540-69972-9 – URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9>
3. Michlmayr, G., Cohen D. and Or D. [2012] Sources and characteristics of acoustic emissions from mechanically stressed geologic granular media - A review / G. Michlmayr, D. Cohen, D. Or // Earth-Science Reviews, – 2012. – Vol. 112. – Is. 3-4. – P. 97-114. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.02.009 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.009>

4. Dryagin, V. V. Seismoacoustic emission of an oil-producing bed / V. V. Dryagin // Acoustical Physics. – 2013. – Vol. 59, No. 6. – P. 694-701. – DOI: 10.1134/S1063771013050060. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063771013050060>
5. J. W. Strutt (Lord Rayleigh) Theory of Sound in 2 volumes / J. W. Strutt // – M.: State Publishing House of Technical and Theoretical Literature. – 1955. – 504 p.
6. Lighthill, M. J. On sound generated aerodynamically. I. General theory / M. J. Lighthill // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1952. – Vol. 211. – Iss. 1107. – P. 564–587. – DOI: 10.1098/rspa.1952.0060. – URL: <https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0060>
7. Curle, N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound / N. Curle // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1955. – Vol. 231. – P. 505–514. – DOI: 10.1098/rspa.1955.0191. – URL: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1955.0191>
8. Afanasyev, E. F. On sources of sound generation in fluid-saturated porous media / E. F. Afanasyev, K. L. Grdzheva, D. V. Plyushchev // Reports of the USSR Academy of Sciences. - 1987. - No. 3. - P. 554-557.
9. Ovchinnikov, M. N. Mechanism of sound formation during filtration in porous media / M. N. Ovchinnikov, A. Yu. Zavidonov // Proceedings of the International Forum on Problems of Science, Technology and Education. - M.: Academy of Earth Sciences, 2002. - V.3. - P. 135-136.
10. Ipatov, A. I. Testing the method of analyzing the amplitude-frequency spectra of acoustic and electromagnetic noise signals when assessing fluid filtration in rocks / A. I. Ipatov, A. V. Gorodnov, L. P. Petrov // AIS "Karotazhnik". - 2004. - No. 122. - P. 51-66.
11. Ipatov, A. I. Studies of the amplitude-frequency spectra of acoustic and electromagnetic noise signals during fluid filtration in rocks / A. I. Ipatov, A. V. Gorodnov, [et al.] // Geophysics. - 2004. - No. 2. - P. 25-30.
12. Belikov, V.T. Modeling of acoustic-emission processes in a solid / V.T. Belikov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2008. – Vol. 44. № 6. – P. 429-435. – DOI: 10.1134/S1061830908060090. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1061830908060090>
13. Dryagin, V. V. Search for hydrocarbons by the method of induced seismoacoustic emission in wells / V. V. Dryagin, A. A. Starodubtsev, [et al.] // Acoustical Physics. – 2005. – Vol. 51. – P. S54-S60. – DOI: 10.1134/1.2133953 – URL: <https://doi.org/10.1134/1.2133953>
14. Ivanova, E.A. Resonances within an ensemble of pores as a possible model for the formation of the acoustic radiation spectrum during gas filtration through porous media / Ivanova E.A., Mikhailov D.N. // Scientific Notes of the Physical Faculty of Moscow University. - 2017. - No. 5. - P. 1750805.
15. Mikhailov, D. N. Modeling the Spectral Features of Acoustic Noise Produced by Gas Flow in Rock Samples Based on the Theory of Ensemble of Interconnected Pore Resonators / D. N. Mikhailov, E. A. Ivanova // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2019. – Vol. 55, No. 3. – P. 509-516. – DOI 10.1134/S1069351319030054. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1069351319030054>
16. Nikolaev, S. A. Spectral sound-generation of filtration flow in injection wells / S. A. Nikolaev, M. N. Ovchinnikov, G. F. Kandaurova // Neftyanoe Khozyaistvo. – 1992. – №2. – P. 40-42.
17. Nikolaev, S. A. Sound generation by filtration flow in porous media / S. A. Nikolaev, M. N. Ovchinnikov // Acoustic journal. - 1992. - V. 38. No. 1. - P. 114-118.
18. Sergeev, S. I. Laboratory investigation of sound induced by gas flow in porous media / S. I. Sergeev, N. I. Ryzhikov, D. N. Mikhailov // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. V. 172. P. 654-661. – DOI: 10.1016/j.petrol.2018.08.018 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.018>
19. Lebedev, A. V. Nonlinear relaxation mechanism of filtration noise generation in porous media / A. V. Lebedev // News of higher educational institutions. Radiophysics. - 2018. - Vol. 61, No. 4. - P. 343-357.

20. Lebedev, A. V. Comparison of theory with the results of measurements of fluid filtration noise in a porous medium / A. V. Lebedev // Acoustic journal. - 2022. - Vol. 68, No. 5. - P. 530-542. - DOI: 10.31857/S0320791922040062. - URL: <https://doi.org/10.31857/S0320791922040062>
21. Metelev, I. S. Study of acoustic noise during gas filtration through a porous medium / I. S. Metelev, M. N. Ovchinnikov, [et al.] // Acoustic journal. - 2019. - Vol. 65, No. 2. - P. 214-222. - DOI: 10.1134/S0320791919020096. - URL: <https://doi.org/10.1134/S0320791919020096>
22. Markov, M. G. Propagation of elastic longitudinal waves in a saturated porous medium with spherical inhomogeneities / M. G. Markov // Acoustic Journal. - 2005. - V. 51. Appendix. - P. 132-139.
23. Frenkel, Ya.I. On the theory of seismic and seismoelectric phenomena in wet soil / Ya.I. Frenkel // Bulletin of the USSR Academy of Sciences, series. geogr. and geoph. - 1944. - Vol. 8, No. 4. - P. 133-149.
24. Biot, M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid – saturated porous solid, I: Low frequency range // Journal of the Acoustical Society of America – 1956. – V. 28, №2. – P.168-191. – DOI: 10.1121/1.1908239 – URL: <https://doi.org/10.1121/1.1908239>
25. Nikolaevsky, V. N. Mechanics of saturated porous media / V. N. Nikolaevsky, K. S. Basniev, [etc.] - M: Nedra, 1970. - 339 p.
26. Igolkina, G. V. Study of acoustic emission processes of terrigenous reservoirs / G. V. Igolkina, V. V. Dryagin, Z. S. Mezenina // Oil and Gas Business. - 2018. - Vol. 16, No. 5. - Pp. 14-23. - DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-14-23 - URL: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2018-5-14-23>
27. Lebedev, A. V. Experimental study of slow relaxation of sound velocity in carbonate rock / A. V. Lebedev, S. A. Manakov // Acoustic journal. - 2024. - Vol. 70, No. 2. - P. 253-272. - DOI: 10.31857/S0320791924020138 - URL: <https://doi.org/10.31857/S0320791924020138>
28. Marfin, E.A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator / E.A. Marfin, R.N. Gataullin, A.A. Abdrashitov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 215. – P. 110705. – DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110705 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110705>
29. Martyushev, D. A. Study of void space structure and its influence on carbonate reservoir properties: X-ray microtomography, electron microscopy, and well testing / D. A. Martyushev, I. N. Ponomareva, [et al.] // Marine and Petroleum Geology. – 2023. – Vol. 151. – P. 106192. – DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106192 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106192>
30. Mutovkin, N. V. Modeling of acoustic fields generated by filtration flow in the near-wellbore zone / N. V. Mutovkin, D. N. Mikhailov, I. L. Sofronov // Mathematical modeling. - 2019. - Vol. 31, No. 6. - P. 95-106. - DOI: 10.1134/S0234087919060066. - URL: <https://doi.org/10.1134/S0234087919060066>