

АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В НАСЫЩЕННЫХ КЕРНАХ ПЕСЧАНИКА ПРИ ВИБРОВОЗДЕЙСТВИИ

И.Я. Чеботарева
ИПНГ РАН, e-mail: irinache@inbox.ru

1. Введение

В статье анализируются данные физического моделирования эмиссионного отклика горных пород на вибровоздействие в условиях трехосных статических нагрузок. В экспериментах использованы керны пористого мелкозернистого песчаника месторождений Западной Сибири. Экспериментальные данные предоставлены НПФ «Интенсоник».

Разработка физико-математической модели формирования акустического отклика горных пород на внешнее воздействие и получение новых экспериментальных знаний по этой проблеме важны как для фундаментальных, так и для прикладных исследований: в частности, для обоснования использования метода эмиссионной сейсмической томографии как инструмента изучения структуры литосферы Земли и протекающих в ней геофизических процессов [1–6], также для теоретического обоснования эмпирических скважинных методов определения характера насыщенности пласта–коллектора в режиме регистрация–акустическое воздействие–регистрация [7–9].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В результате многочисленных лабораторных исследований установлено, что при деформировании твердых тел и образцов горных пород, при фильтрации через образцы жидкостей и газа, наблюдается эффект акустической эмиссии в широком диапазоне частот. Отмечено, что эмиссия может быть представлена как дискретной, импульсной, так и непрерывной шумоподобной компонентой [10–13]. Традиционно акустическую эмиссию связывают с ускоренным движением дислокаций и их скоплений при пластической деформации, с выходом дислокаций на свободную поверхность, с образованием и развитием трещин, с фазовыми превращениями вещества, с процессом сухого трения при относительном скольжении внутренних границ и бортов трещин, с разрушением в областях локального контакта микрошероховатых поверхностей [10–12]. В природном массиве горных пород дополнительный вклад в энергетику акустической (сейсмической) эмиссии вносят процессы дегазации, фильтрации жидкостей и газов, химические реакции, электромеханические эффекты [13–19]. При полевых исследованиях,

на характерных для природного массива масштабах, более ярко, чем в модельном эксперименте, проявляются нелинейные свойства геосреды, обусловленные в значительной степени структурной неоднородностью и многомасштабной иерархичностью литосферы Земли [20–23].

Механизмы генерации акустического излучения, связанные с ускоренным движением дислокаций, с ростом микротрещин, с фазовыми и химическими превращениями успешны в объяснении акустического излучения в мегагерцовом и килогерцовом частотных диапазонах, но не объясняют генерацию низкочастотной сейсмической эмиссии в горных породах на частотах в первые десятки герц. Однако перераспределение акустической энергии вверх и вниз по спектру вполне возможно за счет нелинейных эффектов в структурно неоднородных средах. В работах [23–30] предложены различные модели генерации сейсмической эмиссии и перераспределения энергии излучения по спектру.

В некоторых моделях, например, в модели нелинейной структурно неоднородной среды с контактами Герца [30], механизм генерации акустической и сейсмической эмиссии является локальным. Он может быть реализован в небольшом объеме среды, размеры которого меньше длины волны огибающей, но больше волны длины несущей. То есть в экспериментах по физическому моделированию можно выявить эффект генерации низкочастотной ветви непрерывного эмиссионного излучения с использованием небольшого по объему образца керна, размеры которого существенно меньше длины волны низкочастотного акустического излучения.

Ранее такие исследования были нами проведены для «сухих» (газонасыщенных) образцов кернов горной породы [31, 32]. Был обнаружен эффект формирования в горных породах при внешней нагрузке акустического отклика в связанных диапазонах частот, существенно разнесенных по спектру, но имеющих сходную динамику. В качестве количественной характеристики структуры колебаний в различных диапазонах частот использовался индикатор степени упорядоченности режимов колебаний с использованием энтропии Климонтовича [34, 31–33].

Оказалось, что временная динамика волнового поля для диапазонов частот 1–100 Гц и 5–20 кГц находится в хорошем временном соответствии между собой и с изменением режима деформирования. Это свидетельствует о генетической связанности этих диапазонов для исследуемых кернов пород-коллекторов, а также о том, что из

анализа динамики низкочастотной ветви акустического волнового поля можно извлекать информацию о высокочастотных процессах, протекающих в горных породах на микроуровне. В частности, с использованием метода эмиссионной томографии с регистрацией волнового поля на поверхности, при большом удалении от источника, можно получать изображения геологических объектов и наблюдать протекающие в них процессы, сопровождающие изменение напряженно-деформированного состояния структурно неоднородных сред, исследовать их динамику.

На рис. 1 показан пример изменения в спектрах акустического излучения керна в разных диапазонах частот до и после возрастания бокового обжатия до 10 МПа. При деформировании образцов на высоких и низких частотах наблюдается ярко выраженная эмиссионная акустическая реакция среды на изменение бокового давления, при отсутствии существенных изменений в спектре в среднем диапазоне частот.

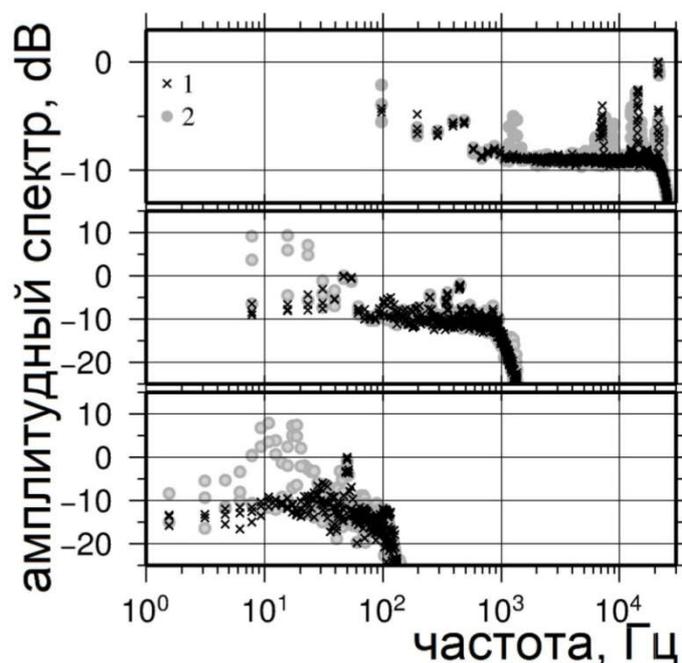


Рис.1. Амплитудные спектры ускорений в диапазонах частот 0–20 кГц, 0–1 кГц и 0–100 Гц, рассчитанные на временных 5-секундных интервалах: 1 – до начала подъема давлений, 2 – при стабилизации давлений после подъема бокового давления до 10 МПа. Нормировка по максимуму спектра интервала 1 [32]

В работе [32] проведен анализ степени согласования полученного экспериментального результата с некоторыми известными моделями генерации сейсмической эмиссии [24–30]. Оказалось, что результаты физического моделирования наилучшим образом объясняются в рамках модели [30] генерации сейсмической эмиссии

на частотах огибающей высокочастотных колебаний элементов геосреды, которая формируется вследствие автомодуляции гармоник высокочастотной акустической эмиссии. Связь между диапазонами несущей и модуляционной волн, которая осуществляется через режим неустойчивости, предельно чувствительна к любым внешним воздействиям. Это делает диапазон «единицы – первые сотни герц» наиболее информативным для исследования геофизических процессов в поле сейсмоакустической эмиссии.

Согласно работе [30], механизм генерации низкочастотной ветви сейсмической эмиссии в структурно неоднородных средах реализуется как результат модуляционной неустойчивости и контролируется значением параметров среды. При этом должен выполняться критерий Лайтхилла на соотношение коэффициентов нелинейности и дисперсии. Так как геологическая среда имеет многомасштабное иерархическое строение, с соответствующей системой коэффициентов нелинейности и дисперсии, порожденная низкочастотная гармоника становится несущей на других масштабах и, при выполнении определенных условий, способна порождать новые, все более низкочастотные гармоники. Таким образом, в фоновом сейсмическом волновом поле может образовываться связанный набор диапазонов частот, существенно разнесенных по спектру, но имеющих сходную динамику.

Необходимо отметить, что использование модели генерации низкочастотной ветви эмиссии, описанной в работе [30], корректно только для «сухих», газонасыщенных кернов. Математическое описание сделано для модели среды в виде одномерных цепочек с герцевской нелинейностью. Модель гранулированных сред широко используется в геофизике, не только для рыхлых, но и для условно монолитных зернистых и кристаллических горных пород. Опыты с фотоупругими материалами визуально показывают [35, 36], что при статической нагрузке и вибровоздействии в гранулированных средах формируется сильно неравномерное распределение локальных напряжений и образуется сеть силовых цепочек, некий «жаркас», который и несет всю силовую нагрузку. Поэтому использование одномерных цепочек для газонасыщенных кернов является достаточно реалистичной моделью.

Для кернов, предельно насыщенных жидкостью, такое описание заведомо не будет являться корректным. Во первых, жидкость в процессе деформирования, при изменении площади контактов, будет создавать существенное дополнительное противодействие

деформированию вдоль цепочек, которым нельзя пренебречь. Во-вторых, жидкость в процессе деформирования будет «выдавливаться» по границам контактов в направлении, ортогональном протяженности цепочек гранул, что требует рассмотрения двумерной или даже трехмерной задачи связанного деформирования цепочек и жидкости.

Все это позволяет предполагать, что реакция на внешнее воздействие насыщенных жидкостью кернов, может существенно отличаться от реакции сухих кернов, трещины и поры в которых насыщены газом.

Далее приведены экспериментальные результаты по изучению реакции флюидонасыщенных кернов на вибровоздействие.

3. Анализ данных акустического отклика на вибровоздействие флюидонасыщенных кернов

В работе анализируются записи акустического фона, полученные при вибровоздействии на образцы кернов горной породы. Флюидонасыщенные керны были предельно насыщены водой, нефтью или керосином. Регистрация фоновых колебаний до, в процессе и после воздействия проводилась на поверхности керна. Осевая чувствительность датчиков-акселерометров 10 мВ/г, диапазон регистрации 10–25000 Гц. Вибровоздействие проводилось на частоте 18 кГц.

3.1. Экспериментальная установка и образцы кернов

При проведении экспериментов по физическому моделированию была использована оригинальная лабораторная установка НПФ «Интенсоник», позволяющая изучать параметры акустической эмиссии представительных образцов кернов при вибровоздействии и статических нагрузках с возможностью моделирования различного типа флюидонасыщенности и фильтрации. Подробное описание установки дано в работе [32]. Исследования волновых эмиссионных процессов в кернах производились в условиях максимально приближенных к пластовым по давлениям и температуре, при трехкомпонентном напряженном состоянии. Образцы нагружались в диапазоне давлений 0–40 МПа, верхняя граница которого соответствует гидростатическому и поровому давлениям в природном массиве на глубинах до 2–3 км.

В экспериментах использовались образцы кернов пористого мелкозернистого песчаника, полученные из коллекторов нефтяных месторождений западной Сибири, глубина залегания 2500–2900 м. Размеры цилиндрического керна: диаметр 30 мм, длина 90 мм.

3.2. Методика обработки данных

При проведении модельных экспериментов регистрация фоновых акустических колебаний проводилась в сверхшироком диапазоне. При анализе данных, для удобства представления результатов, была сделана предобработка, моделирующая регистрацию в менее широких частотных диапазонах. Сначала на исходных записях акустических колебаний с частотой Найквиста 50 кГц подавлялись частоты более 20 кГц с помощью фильтра нижних частот Баттерворта. Переход к увеличенному шагу дискретизации с частотой Найквиста 20 кГц, 1 кГц и 100 Гц проводился посредством децимации после усреднения значений временных отсчетов акустической записи в соответствующих окнах. Для ослабления влияния низкочастотных трендов для высокочастотных записей был сделан переход к приращениям.

Амплитудные спектры вычислялись на временных 5-секундных интервалах в скользящем окне в диапазонах 0–20 кГц, 0–1 кГц и 0–100 Гц. При вычислении амплитудных спектров использовалось быстрое преобразование Фурье (FFT) с наложением окна Ханна во временной области для уменьшения боковых лепестков спектральной оценки. С целью уменьшения дисперсии спектральной оценки использовано усреднение по трем соседним окнам с 50%-ным перекрытием сегментов [37].

3.3. Результаты и их обсуждение

Результаты, представленные на рис. 2, позволяют сравнить амплитудные спектры акустического фона до и после вибровоздействия, на временных интервалах стабилизации давлений в ядрах с разным типом насыщения. Для сравнения, наряду с результатами для ядер, насыщенных жидкостями (водой, нефтью и керосином), показаны спектры для сухого, газонасыщенного ядра.

Хотя воздействие проводилось на частоте 18 кГц, для сухого газонасыщенного ядра уровень фоновых акустических колебаний стабильно возрастает во всем высокочастотном диапазоне 1–20 кГц (см. рис. 2, а). Синхронное возрастание уровня фона хорошо заметно и в нижнем диапазоне частот 10–100 Гц.

Для нефтенасыщенного ядра (см. рис. 2, б) в низкочастотном диапазоне наблюдается уменьшение амплитуд фоновых колебаний, а в высокочастотном диапазоне – двоякий эффект. То есть сужаются границы разброса значений спектра: несколько поднимается нижняя граница и существенно опускается верхняя. Можно сказать, что значения спектра скорее стабилизируются во времени, чем возрастают или уменьшаются.

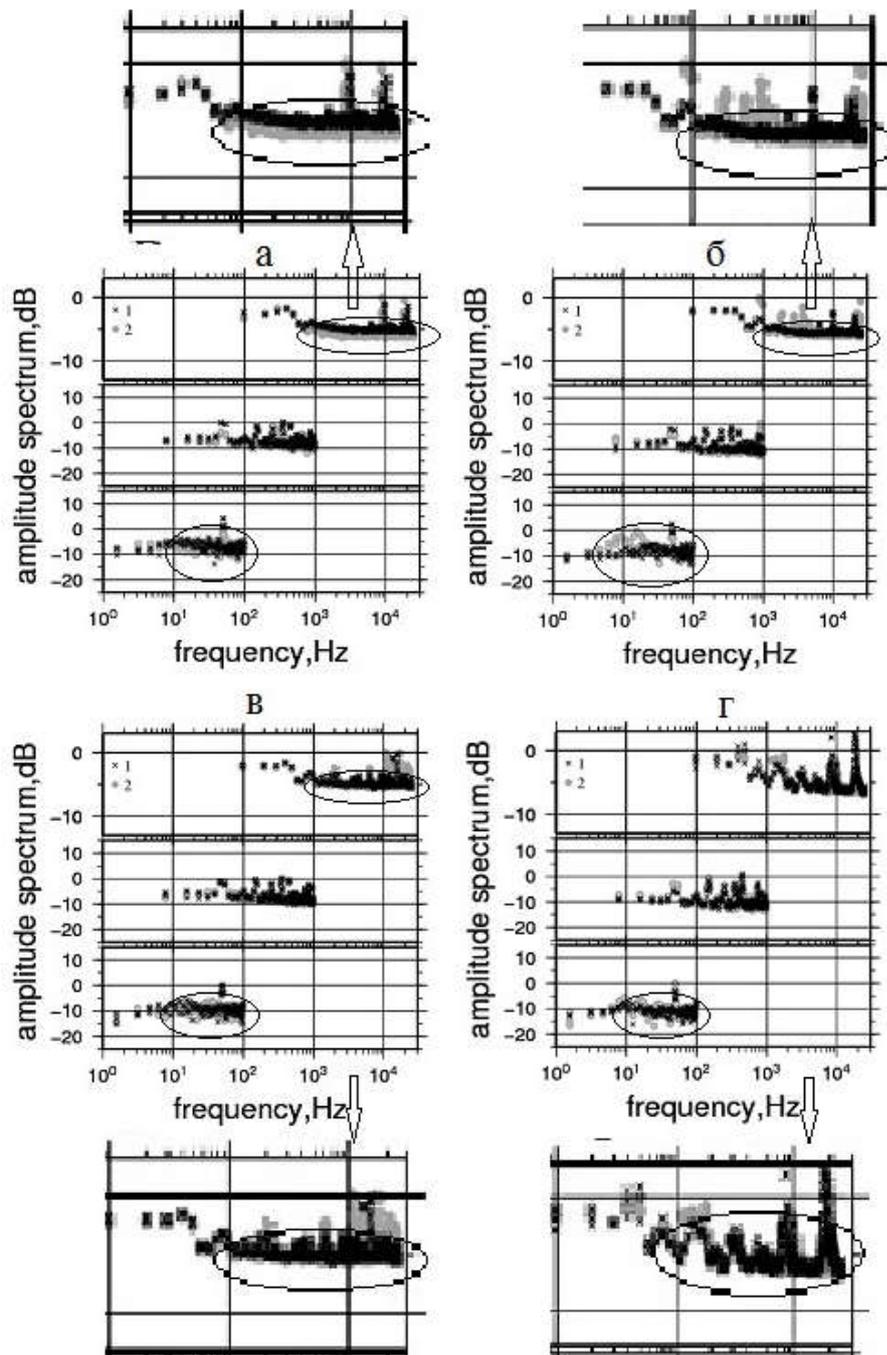


Рис. 2. Амплитудные спектры ускорений в диапазонах частот 0–20кГц, 0–1 кГц и 0–100 Гц, рассчитанные на временных интервалах: 1 – (черные крестики) после окончания и 2 – (серые кружки) до начала вибровоздействия на частоте 18 кГц; а – сухой газонасыщенный керн; б – керн, предельно насыщенный нефтью; в – керн, предельно насыщенный водой; г – керн, предельно насыщенный керосином. Нормировка по максимуму спектра до вибровоздействия, на выносках добавлены увеличенные графики высокочастотных спектров

Для воды и керосина (см. рис. 2, в и рис. 2, г) во всех трех частотных диапазонах четкие различия в уровнях амплитуд спектров не выявляются. Однако, наблюдается также уменьшение амплитуды флуктуаций спектров, то есть стабилизация формы спектров во времени, особенно заметная для низкочастотного диапазона.

Подводя итог, можно сделать вывод, что наиболее яркий акустический отклик на вибровоздействие в виде увеличения мощности фоновых колебаний в высокочастотном (1–20 кГц) и низкочастотном (1–100 Гц) диапазонах наблюдается только для газонасыщенного керна. Для флюидонасыщенных кернов происходит стабилизация значений спектров во времени, без явного изменения среднего уровня спектров. Очень небольшое увеличение нижней границы значений высокочастотных спектров (1–20 кГц) заметно только для нефтенасыщенных кернов. Для кернов, насыщенных водой и керосином, монотонных изменений уровня фоновых колебаний в исследуемом диапазоне частот не наблюдается.

Выявленные закономерности находятся в противоречии с опубликованными результатами полевых работ [7–9], согласно которым при скважинных исследованиях в заполненных жидкостью обсаженных скважинах после вибровоздействия на частоте 20 кГц для фоновых колебаний в широком диапазоне частот были отмечены сильный рост суммарной мощности в нефтенасыщенных пластах и падение мощности в водонасыщенных пластах.

На рис. 3 приведен монтаж рисунков из работы [9]. В ней описаны результаты полевых исследований в обсаженных флюидозаполненных скважинах в коллекторах с различным типом насыщенности. Вибровоздействие проводилось скважинным вибратором на частоте 20 кГц. В скважине же регистрировался акустический фон до и после воздействия. Был получен результат, приведенный на рис. 3. То есть, после вибровоздействия в нефтенасыщенном коллекторе уровень фоновых колебаний существенно возрастает во всем диапазоне частот 0–8000 Гц, а для водонасыщенного коллектора существенно спадает во всем диапазоне. Этот результат послужил основанием для патента [8] и работ [7] по определению текущего насыщения по глубине в большом числе скважин на различных месторождениях. Как отмечают авторы указанных работ, в некоторых случаях метод дает результаты текущей насыщенности коллектора, сходные с результатами других методов (нейтронный гамма-каротаж, каротаж кажущегося сопротивления, гамма-каротаж), а в некоторых случаях результаты отличаются. Прямую

проверку типа насыщения реального массива по техническим причинам осуществить трудно.

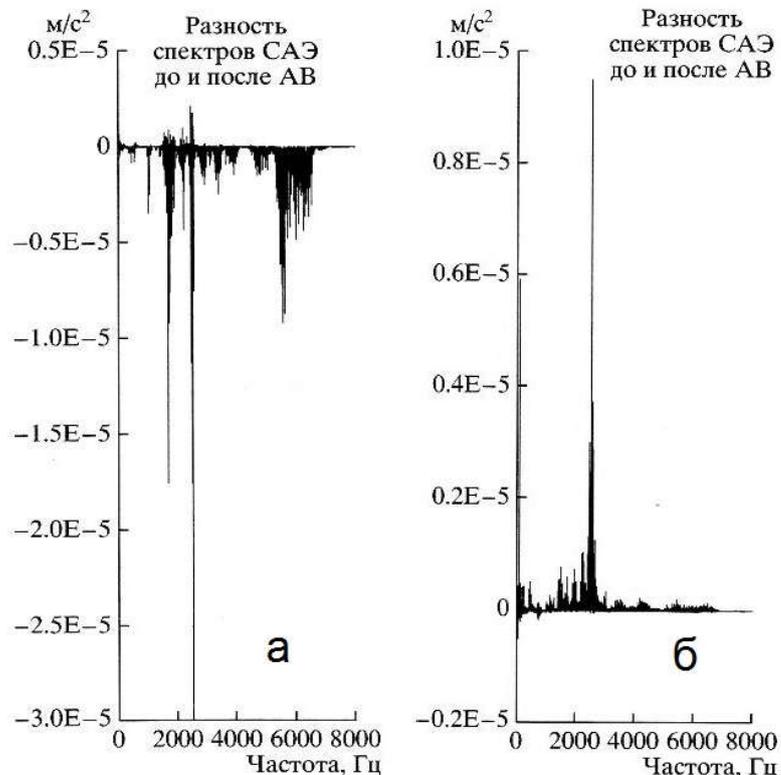


Рис. 3. Разности спектров до и после вибровоздействия: а – в скважине с водонасыщенным коллектором, б – в скважине с нефтенасыщенным коллектором (монтаж рисунков из работы [9])

Налицо явное противоречие экспериментальных результатов. В чем может быть причина?

При проведении модельных экспериментов были использованы предельно насыщенные жидкостями керны. При частичном насыщении реакция кернов может отличаться. Можно, например, ожидать, что слабо заметная тенденция к росту уровня фона предельно нефтенасыщенных кернов может стать более ярко выраженной при частичном насыщении, приближаясь к результатам газонасыщенного керна. Однако, никаких тенденций к снижению уровня фона для частично насыщенных водой кернов не просматривается. Физическое моделирование отклика частично флюидонасыщенных кернов – перспективное направление исследований.

В отношении технологии проведения полевых скважинных работ [7–9] также имеются определенные вопросы. Вибровоздействие в обсаженной скважине, заполненной

жидкостью, проводится на частоте 20 кГц. По своей методике авторы отработали сотни скважин. Однако, в публикациях авторов нигде не приводятся экспериментальных оценок того, какая доля энергии излучателя передается в пласт, а какая – в жидкость. Также отсутствуют экспериментальные исследования по глубине проникновения высокочастотного сигнала в пласт. Многие вопросы можно снять с помощью простых опытов. Более экспериментально обоснованные результаты можно получить в гидроакустическом измерительном бассейне.

Точные представления о глубине проникновения вибровоздействия весьма важны для интерпретации результатов по эмиссионному отклику среды. Если интенсивный высокочастотный сигнал проходит достаточно далеко в пласт, то в качестве модели среды надо рассматривать материал пласта – горную породу, слагающую конкретный пласт. Если сигнал практически полностью поглощается цементной обсадной колонной, то в качестве модели среды надо рассматривать насыщенный пластовым флюидом цемент.

Известны теоретические оценки требований к скважинным излучателям, с учетом того, что амплитуда изменения акустического давления не должна превосходить кавитационный предел [38]. Для воздействия на глубину первых десятков метров частота излучения должна составлять единицы Гц, акустическое давление 1–10 атм, излучаемая во внешнюю упругую среду акустическая мощность должна составлять несколько сотен ватт. Первое условие на частоту излучения при полевом эксперименте точно не выполняется.

Выводы

1. Анализ акустических записей, полученных при моделировании вибровоздействия на керны горной породы с различным типом предельного насыщения выявил слабую высокочастотную реакцию нефтенасыщенных кернов и отсутствие существенных изменений фоновых колебаний в кернах, предельно насыщенных водой и керосином. Для сухих, газонасыщенных кернов акустический отклик ярко выражен в высокочастотном и низкочастотном диапазонах.

2. Полученные результаты не находятся в согласии с результатами опубликованных полевых исследований текущего насыщения в скважинах [5–7]. Для снятия противоречия необходимы дополнительные исследования.

Автор выражает благодарность В.В. Дрягину за предоставление акустических записей экспериментов по физическому моделированию и сопутствующей информации.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Энергетика, динамика и дегазация Земли, теоретические и экспериментальные основы инновационных сейсмоакустических технологий исследования геологической среды и контроля за объектами нефтегазодобычи», № АААА-А16-116021510125-7).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чеботарева И.Я.* Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // *Акуст. журн.* 2011. Т. 57, № 6. С. 844–853.
2. *Чеботарева И.Я.* Трассировка лучей в методе сейсмической эмиссионной томографии // *Радиопромышленность.* 2017. № 1. С.19–25.
3. *Чеботарева И.Я., Володин И.А.* Образы процесса гидроразрыва пласта в сейсмическом шуме // *Докл. РАН.* 2012. Т. 444. № 2. С. 202–207.
4. *Чеботарева И.Я.* Эмиссионная томография – базовый инструмент для технологий изучения месторождений углеводородов [Электронный ресурс] // *Актуальные проблемы нефти и газа: Науч. сет. изд.* 2017. Вып. 2(17). 24 с. – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru> (Дата обращения 09.04.2018).
5. *Чеботарева И.Я.* Методы трассировки лучей в эмиссионной сейсмической томографии // *Физика Земли.* 2018. № 2. С. 12–24.
6. *Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Чеботарева И.Я.* Эндогенные факторы формирования геологических диссипативных структур [Электронный ресурс] // *Актуальные проблемы нефти и газа: Науч. сет. изд.* 2016. Вып. 3(15). 10 с. – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru> (Дата обращения 09.04.2018).
7. *Иголкина Г.В., Дрягин В.В., Мезенина З.С., Иванов Д.Б.* Каротаж сейсмоакустической эмиссии для определения насыщенности коллекторов и его место в комплексе ГИС // *Нефтегазовое дело.* 2016. № 14-3. С. 9–16.
8. *Дрягин В.В.* Пат. RU 2187636 С1. Способ определения характера насыщенности коллектора. № 2001104590/03; Заявл. 21.02.2001; Опубл. 20.08.2002 // *Изобретения. Полезные модели.* 2002. Бюл. № 23. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>.
9. *Дрягин В.В., Кузнецов О.Л., Стародубцев А.А., Рок В.Е.* Поиск углеводородов методом вызванной сейсмоакустической эмиссии // *Акустический журнал.* 2005. Т. 51, Вып. Геоакустика. С. 66–73.
10. *Грешиников В.А., Дробот Ю.Б.* Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976. 272 с.

11. *Баранов В.М.* Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
12. *Сбоев В.М.* Исследование микросейсмической эмиссии, возникающей в образцах горных пород. Новосибирск: Препринт ИГД СО АН СССР, 1988. № 22. 67 с.
13. *Сбоев В.М.* Исследование динамических процессов в массиве горных пород на глубоких подземных предприятиях // Изв. АН СССР. Физика земли. 1982. № 10. С. 57–61.
14. *Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В.* Акустический резонанс нефтяной залежи // ДАН. 2004. Т. 397. № 1. С. 101–102.
15. *Алексеев А.С., Геза Н.И., Глинский Б.М.* и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: ИВМ и МГ СО РАН, 2004. 387 с.
16. *Курленя М.В., Сердюков С.В.* Низкочастотные резонансы сейсмической люминесценции горных пород в вибросейсмическом поле малой энергии // ФТПРПИ. 1999. № 1. С. 3–7.
17. *Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Кисин И.Г., Николаев А.В.* О некоторых эффектах вибрационного сейсмического воздействия на водонасыщенную среду, сопоставление их с эффектами удаленных землетрясений // ДАН СССР. 1987. Т. 297. № 1. С. 52–56.
18. *Dangel S., Schaepman M.E., Stoll E.P., Carniel R., Barzandji O., Rode E.-D., Singer J.M.* Phenomenology of tremor-like signals observed over hydrocarbon reservoirs // J. Volcanology and Geothermal Res. 2003. Vol. 128. P. 135–158.
19. *Engelbrecht J., Khamidullin Y.* On the possible amplification of nonlinear seismic waves // Phys. Earth Planet. Inter. 1988. Vol. 50. No. 1. P. 39–45.
20. *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
21. *Руденко О.В.* Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН. 2006. Т. 176. № 1. С. 97–102.
22. *Есипов И.Б., Рыбак С.А., Серебряный А.Н.* Нелинейная акустическая диагностика земных пород и океана // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 1. С. 102–108.

23. *Зайцев В.Ю.* О «неклассических» проявлениях микроструктурно-обусловленной акустической нелинейности на примере контактодержащих сред // В сб. «Нелинейные волны, 2006». Нижн. Новгород: ИПФ РАН. 2007. 576 с.
24. *Крылов А.Л., Николаевский В.Н., Эль Г.А.* Математическая модель нелинейной генерации ультразвука сейсмическими волнами // ДАН СССР. 1991. Т. 318. № 6. С.1340–1344.
25. *Динариев О.Ю., Николаевский В.Н.* Кратное увеличение периода при распространении волн в упругих телах с диссипативной микроструктурой // Изв. АН. МТТ. 1997. № 6. С. 78–85.
26. *Динариев О.Ю., Николаевский В.Н.* Ползучесть горных пород как источник сейсмического шума // Докл. АН. 1993. Т. 331. № 6. С. 739–741.
27. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М: Недра. 1996. 448 с.
28. *Гарагаи И.А.* Модель динамики фрагментированных сред с подвижными блоками // Физич. мезомеханика. 2002. Т. 5. № 5. С. 71–77.
29. *Сибиряков Б.П., Бобров Б.А.* О природе возникновения акустической эмиссии при статическом нагружении песков // Физич. мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С 80–84.
30. *Володин И. А., Чеботарева И. Я.* Сейсмическая эмиссия в зонах техногенных воздействий // Акустический журнал. 2014. Т. 60. № 5. С. 505–517.
31. *Чеботарева И.Я., Володин И.А., Дрягин В.В.* Генерация низкочастотной ветви акустической эмиссии в горных породах под воздействием // Докл. АН. 2016. Т. 468. № 2. С. 205–208.
32. *Чеботарева И.Я., Володин И.А., Дрягин В.В.* Акустические эффекты при деформировании структурно-неоднородных сред // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 1. С. 84–93.
33. *Чеботарева И.Я., Володин И.А.* Критерий степени упорядоченности режимов автоколебаний для анализа динамики геофизической среды // Докл. АН. 2010. Т. 432. № 1. С. 115–119.
34. *Климонтович Ю.Л.* Статистическая теория открытых систем. М.: ТОО Янус, 1995. Т. 1. 622 с.
35. *Jaeger H. M., Nagel S.R.* Granular solids, liquids, and gases // Reviews of Modern Physics. 1996. Vol. 68, No. 4. P. 1259–1273.

36. *Jia X., Caroli C., Velicky B.* Ultrasound propagation in externally stressed granular media // *Phys. Rev. Lett.* 1999. Vol. 82. Iss. 9. P. 1863–1866.

37. *Marple S.* Digital Spectral Analysis with Applications. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. 1987. 492 p.

38. *Максимов Г.А.* Требования к скважинным излучателям на основе оценки акустических полей при излучении из скважины // Воздействие упругих волн на флюиды в пористых средах (EWEF-2012): Сб. тр. III Междунар. конф. М.: РГГУ им. И.М. Губкина, 2012. С. 34–38.