

УДК: 534.141.4; 532.685  
OECD: 1.05 LE

## Спектральные характеристики шумов фильтрации газа в образцах карбонатных коллекторов

Марфин Е.А.<sup>1</sup>, Овчинников М.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>К.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Теплофизики и волновых технологий», Институт энергетики и перспективных технологий,

ФИЦ Казанский научный центр РАН, г. Казань, РФ,

<sup>2</sup>Д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры «Радиоэлектроники», Институт физики Казанского федерального университета, г. Казань, РФ

### Аннотация

В работе представлены результаты экспериментального исследования акустических характеристик шума потока газа в пористых образцах карбонатных пород. Получены спектры шумов фильтрации для образцов с различными значениями проницаемости при разных градиентах давления. На основе обобщения экспериментальных данных установлено, что среднее значение интенсивности шумов фильтрации зависит от градиента давления в четвертой степени, что подтверждает квадратичную зависимость амплитуды генерируемых звуковых колебаний от скорости фильтрации. Было установлено, что при одинаковой скорости фильтрации образцы с более низкой проницаемостью и пористостью демонстрировали более высокую интенсивность звука. Полученные результаты имеют важное значение для развития теории генерации фильтрационного шума и интерпретации данных, зарегистрированных скважинным шумомером.

**Ключевые слова:** керн, пористая среда, фильтрация, газ, акустическая эмиссия, спектр, интенсивность звука.

## *Spectral characteristics of gas filtration noise in carbonate reservoir samples*

*Marfin E.A.<sup>1</sup>, Ovchinnikov M.M.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*PhD, assistant professor, Leading researcher of the laboratory of Thermophysics and Wave Technologies, Federal Research Center 'Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences'*

<sup>2</sup>*DSc, assistant professor, professor of the department of Radioelectronics, Institute of Physics, Kazan Federal University, Kazan, Russia*

### **Abstract**

*The present paper sets out the findings of an experimental study into the acoustic characteristics of gas flow noise in porous carbonate rock samples. Filtration noise spectra for samples exhibiting different permeability values at varying pressure gradients were obtained, and generalized experimental data was found to demonstrate that the average value of filtration noise intensity depends on the pressure gradient to the fourth degree. This finding thus confirms the quadratic dependence of the amplitude of generated sound oscillations on the filtration velocity. Furthermore, it was established that, at a constant filtration rate, samples characterized by lower permeability and porosity exhibited higher sound intensity. The findings of this study are of significant importance for the advancement of the theory of filtration noise generation and the interpretation of borehole spectral noise logging data.*

**Keywords:** *core, porous medium, filtration, gas, acoustic emission, spectrum, sound intensity.*

## Введение

Для изучения состояния скважин и околоскважинного пространства применяются различные геофизические методы. Одним из наиболее перспективных и эффективных методов, используемых для исследования акустических характеристик в различных инженерных и геофизических задачах, является метод скважинной шумометрии [1-4]. Этот метод включает в себя регистрацию акустического шума, который возникает внутри скважины, а также последующую интерпретацию и анализ его спектральной картины [5]. Спектральный анализ позволяет выявить специфические особенности и закономерности в распределении частот шума, что, в свою очередь, предоставляет ценную информацию о процессе или явлении, которое вызывает этот шум. Источниками акустического шума в скважинах могут быть различные физические и механические процессы [6-8]. К таким источникам можно отнести, например, турбулентный шум, возникающий в результате течения жидкости или газа по трубопроводу. Кроме того, шум может быть обусловлен потоками, возникающими в местах нарушения целостности труб, а также заколонными перетоками, когда происходит движение пластового флюида через геологические образования в зоне между скважиной и продуктивным пластом. Еще одним важным источником акустического шума является фильтрация в пористых средах, где процессы переноса жидкости или газа сопровождаются определенными вибрациями и звуковыми колебаниями. В некоторых случаях акустическая эмиссия может исходить от элементов скважин и продуктивных пластов, которые подвергаются механическим нагрузкам и деформации, что также вызывает специфические акустические сигналы. В процессе разработки месторождений горные породы и продуктивные пласты испытывают различные напряжения и деформацию. Как отмечено в обзорной статье [9] и работе [10] источниками акустической эмиссии при таких нагружениях могут быть: перестройка структуры среды; трение частиц среды; образование трещин; фильтрация флюида; движение границ раздела «газ-жидкость». Шум каждого источника в скважине характеризуется уникальным амплитудно-частотным спектром [11].

Относительно механизма генерации звуковых колебаний при течении жидкости через пористые среды в настоящее время в научном сообществе отсутствует единое мнение. В научной литературе представлены различные гипотезы, объясняющие процессы, приводящие к образованию фильтрационного шума. Некоторые учёные утверждают, что движение жидкости в пористой среде связано с турбулентными явлениями, возникающими из-за образования микроскопических вихрей в потоке жидкости [12]. Взаимодействие этих вихрей с твердой поверхностью пор, в свою очередь, могут вызывать генерацию колебаний, аналогичную процессам в струйном осцилляторе Гельмгольца [13]. Другие исследователи акцентируют внимание на пульсирующем характере движения жидкости или газа, проходящего через межпоровые сужения в пласте, что также приводит к возникновению акустических колебаний и шума [14]. Спектральную «окраску» шумов фильтрации описывает альтернативная гипотеза, которая предполагает, что пористую среду можно рассматривать как совокупность резонаторов Гельмгольца [15]. Согласно ей, движение жидкости через такие резонаторы вызывает акустические колебания на их собственных резонансных частотах. Результаты экспериментальных исследований, представленных в работе [16], подтверждают эту гипотезу. В этих экспериментах, проведенных на образцах карбонатных пород и песчаников, было установлено, что известняковые образцы генерируют шум в диапазоне частот от 2 до 30 кГц, в то время как шум, исходящий от песчаника, значительно отличается и возникает в диапазоне от 1 до 5 кГц. При этом отмечено, что сложные по своей структуре карбонатные породы проявляют большую склонность к генерации акустических колебаний, чем более однородные песчаники. В работе [17] предложена

теория, объясняющая возникновение фильтрационного шума, которая согласуется [18] с результатами предыдущих экспериментов, проведенных авторами [19]. Тем не менее, отсутствие общепринятой теории фильтрационной шумогенерации продолжает вызывать значительные разногласия среди ученых, что, в свою очередь, затрудняет интерпретацию данных, получаемых при регистрации сигналов с помощью скважинных шумомеров.

В настоящей работе исследованы шумы, генерируемые при фильтрации газа через образцы карбонатных пористых сред. Выбор карбонатных коллекторов в качестве объектов исследования обусловлен тем, что в этих проницаемых породах, состоящих в основном из известняков и доломитов, содержится до 60% мировых запасов углеводородов. При этом характерной особенностью карбонатных пород также является анизотропия их коллекторских и физических свойств, обусловленная трещиноватостью [20].

## 1. Методика проведения экспериментов и объекты исследования

Для проведения экспериментальных исследований, направленных на анализ акустического шума, возникающего при фильтрации газов через пористую среду, был использован специально разработанный лабораторный стенд, схема которого представлена на рисунке 1, и соответствующая методика эксперимента. Детальное описание используемой методологии можно найти в работе [19]. В ходе эксперимента акустические колебания, возникающие в пористых образцах (1) при фильтрации газа, регистрировались с помощью контактного микрофона (6), который располагался на боковой поверхности исследуемого образца пористой среды. Такое расположение датчика позволяет исключить шумы натекания на него потока газа, выходящего из образца. Сигнал, полученный с контактного микрофона, подавался на предусилитель (7), для его усиления и дальнейшей обработки. После предусилителя сигнал поступал на анализатор спектра ZET 017-U4 (8), который выполнял функцию аналого-цифрового преобразования и обеспечивал преобразование аналогового сигнала в цифровую форму для последующего анализа. На заключительном этапе данные передавались на персональный компьютер (9), где проводилась их дальнейшая обработка и анализ с использованием специализированного программного обеспечения CoolEditPro. Такой комплексный подход позволяет получать данные, которые необходимы для детальной интерпретации акустических характеристик шума, генерируемого при фильтрации газа через пористую среду.

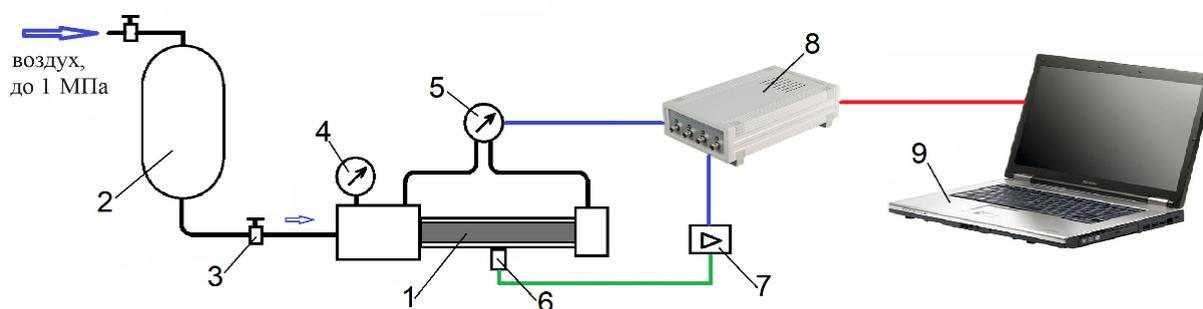


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – пористый образец, 2 – ресивер, 3 – вентиль-регулятор давления, 4 – стрелочный манометр, 5 – датчик разности давления, 6 – контактный микрофон, 7 – предусилитель, 8 – анализатор спектра, 9 – ноутбук

Объектами исследования в работе были пять образцов карбонатных пород нефтяных месторождений Татарстана, обладающих отличающимися

между собой фильтрационно-емкостными свойствами. Образцы диаметром 25 мм и высотой 50 мм отбирались исходя из их пригодности для предполагаемого анализа (рисунок 2). Фильтрационные и емкостные свойства их измерялись в лаборатории Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета на анализаторе газопроницаемости и пористости ПИК-ПП (АО «Геологика»). Некоторые полученные характеристики пористых образцов представлены в таблице 1.

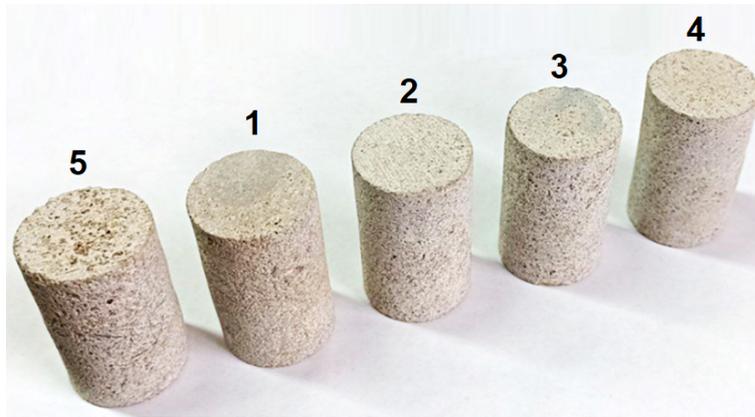


Рис. 2. Фотографии пористых образцов

Таблица 1

Свойства образцов карбонатных коллекторов

| № образца | Пористость, % | Проницаемость, мД | Плотность, кг/м <sup>3</sup> |
|-----------|---------------|-------------------|------------------------------|
| 1         | 11,5          | 439               | 2700                         |
| 2         | 13,6          | 598               | 2690                         |
| 3         | 14,2          | 878               | 2710                         |
| 4         | 15,8          | 1117              | 2660                         |
| 5         | 16,8          | 1994              | 2690                         |

## 2. Спектральные характеристики пористых образцов

Эксперименты проводились как в стационарном режиме при постоянном градиенте давления, так и в нестационарном режиме. Постоянный расход газа в первом случае обеспечивался регулятором давления (3). Во втором, для обеспечения нестационарного режима ресивер (2) заполнялся воздухом до определенного давления, вентиль (3) полностью открывался и весь воздух выходил из ресивера через пористый образец. При этом давление перед образцом падало, градиент давления и объемный расход снижались. В процессе фильтрации происходила генерация шума. Спектры шумов каждого образца отличались между собой. На рисунке 3 представлены спектры шумов фильтрации для некоторых образцов, полученные при различных градиентах давления. Общей чертой спектров для всех образцов является то, что характерные частоты ниже 10 кГц. В фильтрационном течении по закону Дарси скорость потока пропорциональна градиенту давления. Следовательно, увеличение перепада давления увеличивает скорость фильтрации и приводит к повышению амплитуды шума. При этом значения частот характерных пиков в спектре не меняются. Учитывая тот факт, что проницаемость пористых образцов отличается между собой, следовало ожидать, что и

максимальные амплитуды шума фильтрации при одинаковых градиентах давления будут разными, что и подтверждают представленные на рисунках 3 данные.

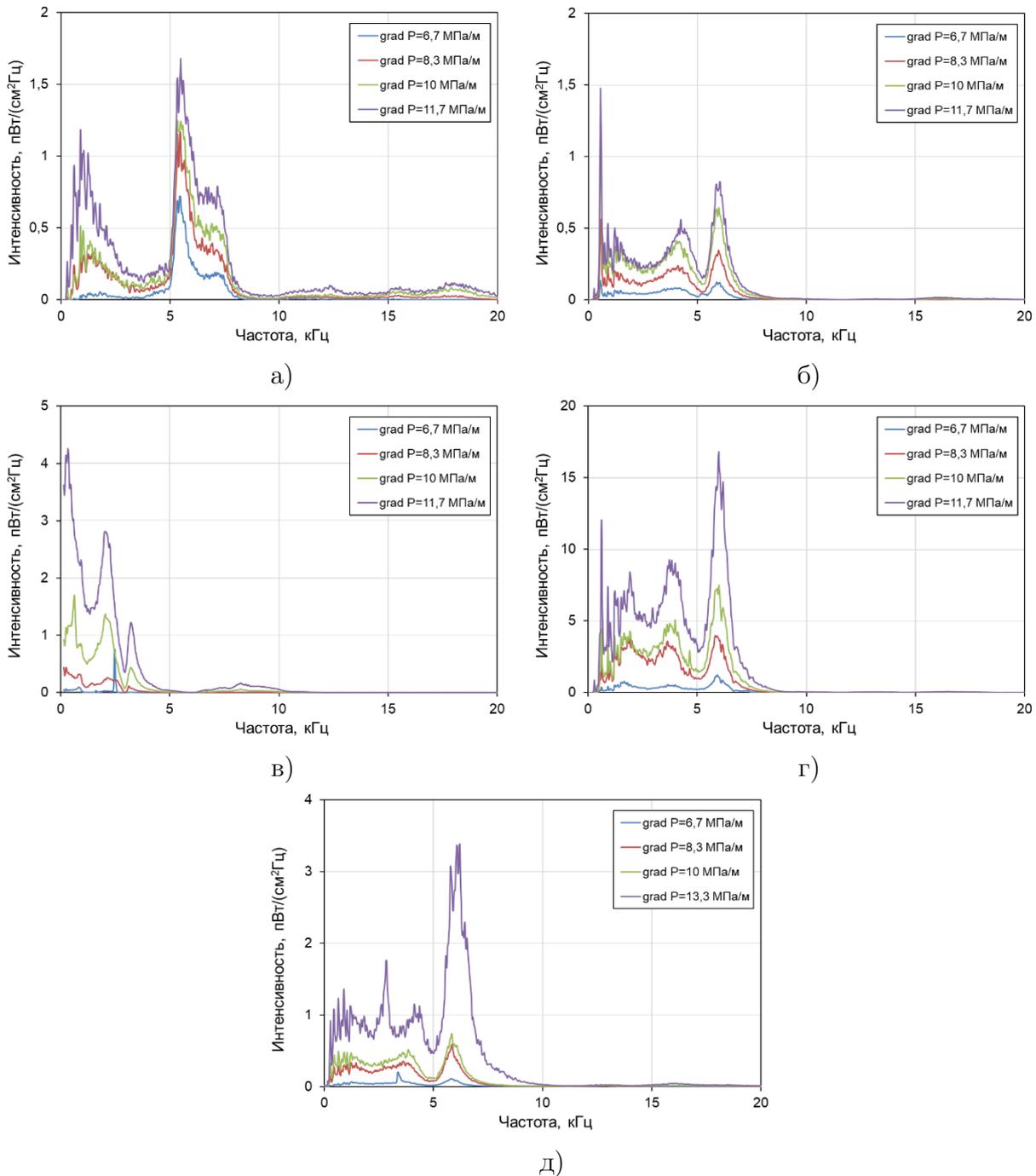


Рис. 3. Спектры приведенной к частоте интенсивности шумов фильтрации: а) образец 1, б) образец 2, в) образец 3, г) образец 4, д) образец 5

В спектре акустического шума наблюдается явный максимум, который возникает при каждом значении перепада давления. В предыдущей работе [21] были установлены зависимости между максимальным значением интенсивности шума в спектре и объемной скоростью фильтрации газа через образец. При этом для каждого конкретного образца эти зависимости имели свою уникальную форму. В рамках настоящего исследования были получены аналогичные зависимости для интегральной интенсивности шума фильтрации. Однако, когда мы разделили объемный расход на значение проницаемости,

экспериментальные данные для всех образцов оказались близкими к единой зависимости. На рисунке 4 представлена зависимость интегральной интенсивности шума фильтрации от градиента давления, который воздействует на пористый образец. Эта зависимость хорошо аппроксимируется степенной функцией с показателем степени, равным 4. Учитывая, что интенсивность звука пропорциональна квадрату амплитуды, можно сделать вывод, что амплитуда фильтрационных шумов будет зависеть от скорости фильтрации и изменяться как квадратичная функция от этой скорости. Также из полученных данных видно, что с увеличением проницаемости пористого образца генерация шумов начинает проявляться при более высоких значениях скоростей фильтрации. Это подтверждает вывод, сделанный в работе [16], о том, что акустический шум в образцах горных пород появляется только тогда, когда число Форкхаймера превышает значения в диапазоне 0,1–0,3. Полученные экспериментальные данные могут свидетельствовать о том, что перепад давления оказывает влияние на изменение структуры каналов фильтрации, например, на изменение размеров трещин. Важно отметить, что карбонатные коллекторы характеризуются не только пористостью, но и трещиноватостью, что играет значительную роль в их проницаемости. В качестве гипотезы можно предложить, что при увеличении градиента давления проницаемость трещин может снижаться. Это, в свою очередь, приводит к снижению общей проницаемости коллектора и уменьшению объемного расхода газа. Таким образом, результаты экспериментов подтверждают важность учета изменений в структуре трещин при оценке фильтрационных процессов в карбонатных коллекторах.

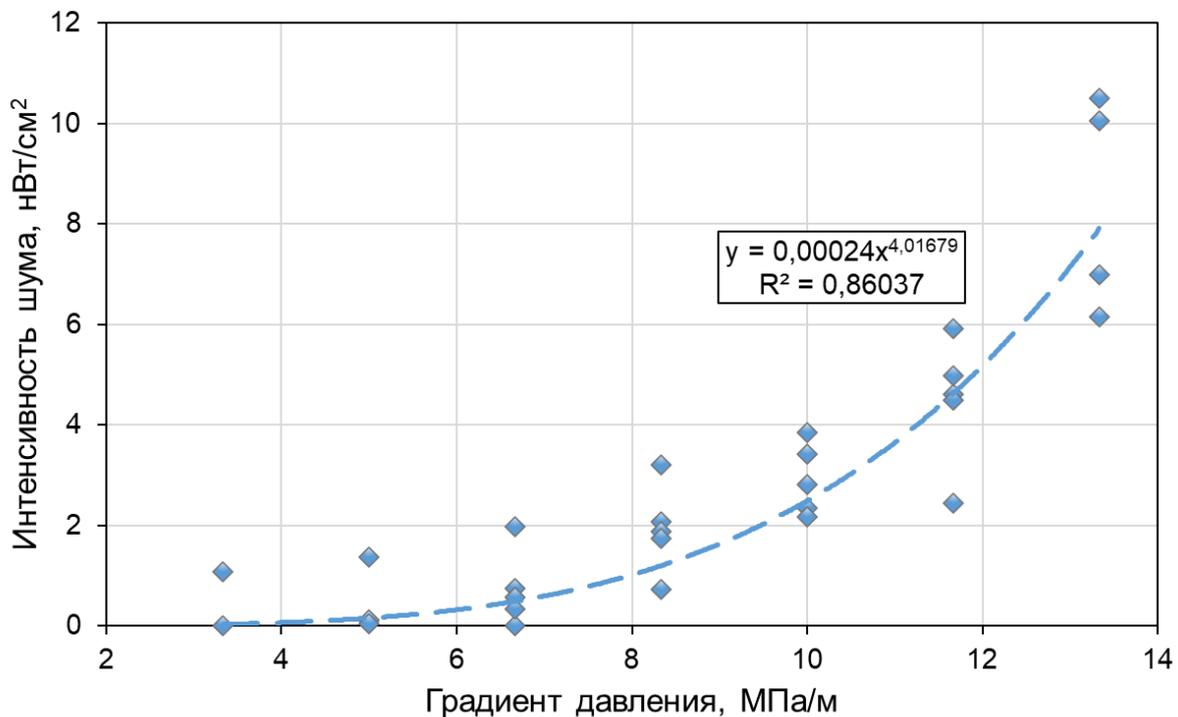


Рис. 4. Зависимость интенсивности шума фильтрации от градиента давления

### Заключение

В данной работе были исследованы акустические шумы, генерируемые потоком газа через образцы пористых сред. Эксперименты показали, что для карбонатных пород интегральная интенсивность шумов фильтрации зависит от градиента давления,

причем данная зависимость описывается степенной функцией с показателем 4. Это подтверждает гипотезу о квадратичной зависимости амплитуды акустических колебаний от скорости фильтрации. Важным результатом является то, что при одинаковых значениях скорости фильтрации образцы с более низкой проницаемостью и пористостью демонстрируют более высокую интенсивность шума. Эти данные помогают глубже понять механизмы формирования фильтрационного шума в пористых материалах. Также было выявлено, что увеличение проницаемости и пористости образца способствует снижению интенсивности генерируемого шума. Полученные результаты могут быть полезны при анализе акустических данных, получаемых с помощью скважинных шумомеров, и имеют важное значение для совершенствования методов мониторинга фильтрационных процессов в природных и инженерных системах [22]. В дальнейшем предполагается расширение экспериментов для более детальной проработки зависимости акустических характеристик от различных физических свойств образцов.

### 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. Кузнецов Ю.И. Акустический каротаж как возможный метод исследования трещиноватости горных пород / Ю. И. Кузнецов // Каротажник. – 2017. – № 2(272). – С. 95-107.
2. Ройтер М. Акустический шум угольного пласта как показатель геодинамического состояния очистного забоя / М. Ройтер, М. Крах, У. Кислинг, Ю. А. Векслер // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 23-30.
3. Дрягин В.В. Каротаж акустической эмиссии в цикле повышения нефтеотдачи и контроля источников обводнения месторождения / В. В. Дрягин, Д. Б. Иванов, И. А. Черных, А. В. Шумилов // Каротажник. – 2014. – № 10(244). – С. 57-64.
4. Патент № 2787265 Российская Федерация, МПК G01V 1/40, G01V 1/48, E21B 47/107. Способ скважинной акустической шумометрии: № 2021139958: заявл. 30.12.2021; опубл. 09.01.2023 / Софронов И. Л., Михайлов Д. Н.; заявитель Шлюмберже Текнолоджи Б.В. – 22 с. – Текст: непосредственный.
5. Ovchinnikov M.N. Acoustic control of hydrodynamic flows in wells / M. N. Ovchinnikov, F. F. Karimov, A. S. Nikolaev // Georesources. – 2001. – №1. – P. 31–32.
6. Морозова К.Г. Связь состояния сдвиговой трещины в гранулированном материале и акустоэмиссионных и деформационных данных / К. Г. Морозова, А. А. Остапчук // Акустический журнал. – 2022. – Т. 68, № 5. – С. 543-549.
7. Дрягин В.В. Сейсмоакустическая эмиссия нефтепродуктивного пласта / В. В. Дрягин // Акустический журнал. – 2013. – Т. 59, № 6. – С. 744-751.
8. Лавров А.В. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) / А. В. Лавров, В. Л. Шкурятник // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51, № 7. – С. 6-18.

9. Michlmayr G. 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, N (3-4). – P. 97-114.
10. Марфин Е.А. Акустическая эмиссия при фильтрации флюидов в пористых средах / Е. А. Марфин, М. Н. Овчинников // *Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы: Альманах*. – М.: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2022. – С. 102-125.
11. Яруллин Р.К. Исследование факторов, определяющих амплитудно-частотные характеристики акустических шумов при проведении геофизических исследований / Р. К. Яруллин, Р. А. Валиуллин, А. Р. Яруллин [и др.] // *ПРОнефть. Профессионально о нефти*. – 2021. – Т. 6, № 2. – С. 20-27.
12. Nikolaev S.A. Sound Generation by a Filtrational Flow in Porous Media / S. A. Nikolaev, M. N. Ovchinnikov // *Akusticheskiy Zhurnal*. – 1992. – Vol. 38. № 1. – P. 114-118.
13. Марфин Е.А. Численные и экспериментальные исследования генерации звука в струйном осцилляторе Гельмгольца с целевой камерой / Е. А. Марфин, А. А. Абдрашитов // *Noise Theory and Practice*. – 2023. – Т. 9, № 3(34). – С. 7-17.
14. Ипатов А.И. Исследование амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах / А. И. Ипатов, А. В. Городнов, С. И. Ипатов [и др.] // *Геофизика*. – 2004. – № 2. – С. 25-30.
15. Иванова Э.А. Резонансы внутри ансамбля пор как возможная модель формирования спектра акустического излучения при фильтрации газа через пористые среды / Э. А. Иванова, Д. Н. Михайлов // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. – 2017. – Т. 5. – 1750805.
16. Sergeev S. Laboratory investigation of sound induced by gas flow in porous media / S. Sergeev, N. Ryzhikov, D. Mikhailov // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 172. – P. 654-661.
17. Лебедев А.В. Численное моделирование шума фильтрации / А. В. Лебедев // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 155-171.
18. 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.
19. Метелев И.С. Исследование акустических шумов при фильтрации газа через пористую среду / И. С. Метелев, М. Н. Овчинников, Е. А. Марфин [и др.] // *Акустический журнал*. – 2019. – Т. 65, № 2. – С. 214-222.
20. 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.
21. Марфин Е.А. Анализ спектральных характеристик фильтрационных шумов в образцах карбонатных пород / Е. А. Марфин, М. Н. Овчинников // *Карбонатные отложения 2024: [Электронный ресурс]: сборник тезисов Международной научно-практической конференции – Текстовое (символьное) электронное издание*. – Новокузнецк: Издательство «Знание-М», 2024.
22. Патент № 2788999 Российская Федерация, МПК E21B 47/10, G01V 1/50. Способ выявления интервалов притока и поглощения флюидов в работающих нефтегазовых скважинах: № 2022120861: заявл. 29.07.2022: опубл. 26.01.2023 / Михайлов Д. Н., Софронов И. Л., Сушина М. Р., Колодезева Е. Д.; заявитель Шлюмберже Текнолоджи Б.В. – 25 с. – Текст: непосредственный.

## References

1. Kuznetsov Yu.I. Acoustic logging as a possible method for studying rock fracturing / Yu. I. Kuznetsov // *Karotazhnik*. – 2017. – No. 2 (272). – P. 95-107.
2. Reuter M. Acoustic noise of a coal seam as an indicator of the geodynamic state of a production face / M. Reuter, M. Krakh, U. Kisling, Yu. A. Veksler // *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. – 2022. – No. 1. – P. 23-30.
3. Dryagin V.V. Acoustic emission logging in the cycle of enhanced oil recovery and control of field flooding sources / V. V. Dryagin, D. B. Ivanov, I. A. Chernykh, A. V. Shumilov // *Karotazhnik*. – 2014. – No. 10(244). – P. 57-64.
4. Patent No. 2787265 Russian Federation, IPC G01V 1/40, G01V 1/48, E21B 47/107. Method for borehole acoustic noise logging: No. 2021139958: declared 30.12.2021: published 09.01.2023 / Sofronov I. L., Mikhailov D. N.; zayavitel' SHlyumberzhe Teknologzhi B.V. – 22 c. – Tekst: neposredstvennyj.
5. Ovchinnikov M.N. Acoustic control of hydrodynamic flows in wells / M. N. Ovchinnikov, F. F. Karimov, A. S. Nikolaev // *Georesources*. – 2001. – №1. – P. 31–32.
6. Morozova K.G. Relationship between the state of a shear crack in a granular material and acoustic emission and deformation data / K. G. Morozova, A. A. Ostapchuk // *Akusticheskij Zhurnal*. – 2022. – Vol. 68, No. 5. – P. 543–549.
7. Dryagin V.V. Seismoacoustic emission of an oil-producing formation / V. V. Dryagin // *Akusticheskij Zhurnal*. – 2013. – Vol. 59, No. 6. – P. 744–751.
8. Lavrov A.V. Acoustic emission during deformation and failure of rocks (review) / A. V. Lavrov, V. L. Shkuratnik // *Akusticheskij Zhurnal*. – 2005. – Vol. 51, No. 7. – P. 6-18.
9. Michlmayr G. 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, N (3-4). –P. 97-114.
10. Marfin E.A. Acoustic emission during fluid filtration in porous media / E. A. Marfin, M. N. Ovchinnikov // *Petrofizika slozhnyh kollektorov: problemy i perspektivy: Al'manah*. – M.: OOO «EAGE Geomodel», 2022. – P. 102-125.
11. Yarullin R.K. Study of factors determining amplitude-frequency characteristics of acoustic noise during geophysical surveys / R. K. Yarullin, R. A. Valiullin, A. R. Yarullin [et al.] // *PROneft'. Professional'no o nefti*. – 2021. – Vol. 6, No. 2. – P. 20-27.
12. Nikolaev S.A. Sound Generation by a Filtrational Flow in Porous Media / S. A. Nikolaev, M. N. Ovchinnikov // *Akusticheskij Zhurnal*. – 1992. – Vol. 38. No. 1. – P. 114-118.
13. Marfin E.A. Numerical and experimental studies of sound generation in a Helmholtz jet oscillator with a slit chamber / E. A. Marfin, A. A. Abdrashitov // *Noise Theory and Practice*. – 2023. – Vol. 9, No. 3 (34). – P. 7-17.
14. Ipatov A.I. Study of amplitude-frequency spectra of acoustic and electromagnetic noise signals during fluid filtration in rocks / A. I. Ipatov, A. V. Gorodnov, S. I. Ipatov [et al.] // *Geophysics*. – 2004. – No. 2. – P. 25-30.
15. Ivanova E.A. Resonances within a pore ensemble as a possible model for the formation of an acoustic radiation spectrum during gas filtration through porous media / E. A. Ivanova, D. N. Mikhailov // *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta*. – 2017. – Vol. 5. – 1750805.
16. Sergeev S. Laboratory investigation of sound induced by gas flow in porous media / S. Sergeev, N. Ryzhikov, D. Mikhailov // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 172. – P. 654-661.
17. Lebedev A.V. Numerical modeling of filtration noise / A. V. Lebedev // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Radiofizika*. – 2020. – Vol. 63, No. 2. – P. 155-171.
18. Lebedev A.V. Comparison of theory with measurement results of fluid filtration

noise in a porous medium / A. V. Lebedev // Akusticheskij Zhurnal. – 2022. – Vol. 68, No. 5. – P. 530-542.

19. Metelev I.S. Study of acoustic noise during gas filtration through a porous medium / I.S. Metelev, M.N. Ovchinnikov, E.A. Marfin [et al.] // Akusticheskij Zhurnal. – 2019. – Vol. 65, No. 2. – P. 214-222.

20. Lebedev A.V. Experimental study of slow relaxation of sound speed in carbonate rock / A.V. Lebedev, S.A. Manakov // Akusticheskij Zhurnal. – 2024. – Vol. 70, No. 2. – P. 253-272.

21. Marfin E.A. Analysis of spectral characteristics of filtration noise in carbonate rock samples / E. A. Marfin, M. N. Ovchinnikov // Karbonatnye otlozheniya 2024: [Elektronnyj resurs]: sbornik tezisov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii – Tekstovoe (simvol'noe) elektronnoe izdanie. – Novokuzneck: Izdatel'stvo «Znanie-M», 2024.

22. Patent No. 2788999 Russian Federation, IPC E21B 47/10, G01V 1/50. Method for identifying intervals of fluid inflow and absorption in operating oil and gas wells: No. 2022120861: declared 07/29/2022: published 01/26/2023 / Mikhailov D. N., Sofronov I. L., Sushina M. R., Kolodezeva E. D.; zayavitel' SHlyumberzhe Teknologzhi B.V. – 25 s. – Tekst: neposredstvennyj.