

АКУСТИКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ СРЕД.
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 534.631,534.141.4

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ
ГАЗА ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ СРЕДУ

© 2019 г. И. С. Метелёв^а, *, М. Н. Овчинников^а, **, Е. А. Марфин^б, ***,
Р. Р. Гайфутдинов^с, ****, Р. Н. Сагиров^с

^аКазанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики,
Россия, 420111 Казань, ул. Кремлевская 16а,

^бИнститут энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН
Россия, 420111 Казань, ул. Лобачевского 2/31,

^сКазанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий,
Россия, 420111 Казань, ул. Чернышевского 5

*e-mail: igor_metelev@mail.ru

**e-mail: mno017@mail.ru

***e-mail: marfin76@mail.ru

****e-mail: ruslangaifutdinov@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.04.2018 г.

После доработки 21.09.2018 г.

Принята к публикации 30.10.2018 г.

Движение жидкостей и газов сквозь пористые среды сопровождается генерацией акустических шумов. Показано, что вид спектров шумов определяется свойствами флюида и пористого коллектора, а также режимом течения. В работе экспериментально подтверждены выводы о независимости расположения максимумов интенсивности звука от скорости фильтрации флюида через пористую среду. Определен критерий возникновения фильтрационных шумов при фильтрации флюида через пористую среду. Исследована зависимость величины максимума звуковой интенсивности от скорости фильтрации флюида. Исследована связь пористости и проницаемости образцов пористых сред с характером спектров шумов фильтрации. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при создании модели звукообразования при фильтрации газа через пористую среду.

Ключевые слова: пористая среда, гидродинамическое звукообразование, амплитудно-частотный спектр, фильтрация, турбулентность, число Рейнольдса

DOI: 10.1134/S0320791919020096

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день активно развиваются акустические методы исследования геологических сред [1–3]. Один из таких методов основан на явлении акустической эмиссии при фильтрации флюида через пористую среду. Данные, регистрируемые при акустическом, электрическом и других видах каротажей, позволяют получить сведения о разрезе скважин по типам пласта, плотности, сопротивлению среды, а также служат для выявления границ газ–нефть, нефть–вода и определения состава насыщающего породы флюида.

Исследования фильтрационных шумов показали, что спектр шума зависит от характеристик пористой среды [2, 7, 9, 16, 21]. Данный вывод позволяет предполагать, что акустический каротаж может быть использован при определении фильтрационных характеристик коллекторов. Однако на сегодняшний день нет однозначного понимания

причин возникновения шумов в пористых средах. Отсутствует также единая математическая модель данного явления.

Одной из первых попыток описать явление генерации звука в насыщенных флюидом пористых средах была работа [4]. Авторы [5] представляют пористую среду в виде совокупности сферических частиц кварца, которые связаны между собой микрочастицами цементирующей породы. Поверхность частиц кварца шероховатая. При фильтрации флюида на этих шероховатостях возникают микроскопические турбулентные потоки. Эти потоки отрываются от шероховатостей и приводят к пульсации давления. Авторы предполагают, что такие пульсации могут являться источником силы, которая возбуждает колебания частиц кварца. В работе представлена математическая модель явления, получено выражение для спектральной плотности звука.

Другой коллектив авторов в своих работах [6, 7] указывает на два процесса, которые приводят к звукообразованию в пористой среде: турбулизация потока флюида в порах и пульсационный характер течения флюида в поровом пространстве. Пульсационный характер течения флюида возникает за счет влияния сужений поперечных сечений капилляров. Места таких сужений то раскрываются под действием образующегося напора и перепада давления на них, то схлопываются, перекрывая сечение потока. Таким образом, течение флюидов в мелких порах приобретает импульсный характер.

В виде модели авторы использовали две сферы радиуса R , соединенные каналом радиуса r и длины l . Движение жидкости между порами происходит порциями из-за скачков давления ΔP в поре. При этом движение жидкости не начинается, пока величина ΔP не превысит некоторую критическую величину. Авторами было получено выражение для характерного времени между пульсациями (1):

$$t = \frac{64}{3} \beta_{\text{pores}} \mu \frac{l}{R} \left(\frac{R}{r} \right)^3, \quad (1)$$

где β_{pores} – сжимаемость пор, μ – вязкость флюида.

Авторы работы [8] также указывают на факт пульсационного течения флюида. Дискретные всплески флюида авторы называют “прыжками Хайнца”.

Авторы работы [9] считают, что поровое пространство горных пород можно описать в виде ансамбля взаимосвязанных внутренних резонаторов Гельмгольца. Основным источником акустического шума при течении газа через пористую среду авторы считают микровихри, образующиеся в порах за счет инерциальных эффектов. Акустический шум, генерируемый микровихрями в порах, имеет широкий спектр частот, но усиливаются только частоты, соответствующие собственным частотам порового пространства.

Возникновение акустической эмиссии также связывают с деформацией и разрушением скелета горной породы [10, 11]. Авторы [12] отмечают, что при двухфазной фильтрации могут образовываться эмульсии каждой фазы (пузырьки газа в воде и водяной пыли в газе). Эти неравновесные эффекты также могут приводить к турбулизации потока флюида и, как следствие, к образованию шума.

Анализ современных представлений показывает, что на сегодняшний день нет общепринятой теории звукообразования при фильтрации жидкостей и газов через пористую среду. Вместе с тем многие авторы связывают возникновение акустических шумов в пористой среде с турбулизацией потока флюида. Во всех проанализированных работах рассматривается возникновение акустических шумов непосредственно внутри пористой

среды. Есть основания полагать, что значительный вклад в спектр шумов фильтрации вносят процессы, происходящие на выходе газа из пористой среды, то есть на границе раздела пористая среда–атмосфера. Также авторы едины в том, что на спектральную картину акустических шумов оказывает значительное влияние геометрия порового пространства. Геометрия порового пространства зависит от размеров частиц, укладки частиц, степени цементации и др. Однако на сегодняшний день отсутствуют экспериментальные данные, связывающие спектральные характеристики шумов фильтрации с размером частиц пористой среды.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования, которое проводилось по следующим направлениям:

- исследование влияния типа коллектора на спектр шумов фильтрации газа;
- подтверждение ранее полученных выводов о независимости положения максимумов интенсивности звука в спектре акустических шумов от скорости фильтрации флюида;
- исследование изменения величины максимума в спектре фильтрационных шумов от скорости фильтрации газа;
- определение критерия возникновения фильтрационных шумов в пористых средах;
- исследование влияния фильтрационных свойств коллекторов на характер спектров шумов.

Выполненные эксперименты отличаются от прежних тем, что на их основе можно сформировать критерий возникновения акустической эмиссии при фильтрации флюида, а также определить зависимость интенсивности шума от скорости фильтрации флюида через образец. Большая репрезентативная выборка естественных образцов карбонатных и терригенных коллекторов позволяет изучить влияние типа коллектора на спектр шумов фильтрации газа через образцы пористой среды.

Результаты исследования могут быть использованы при формировании теории возникновения шума при фильтрации жидкостей и газов через пористые среды.

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД

Целью лабораторного эксперимента являлась регистрация акустических сигналов при фильтрации газа через образцы пористых сред. Для исключения акустических помех лабораторный эксперимент проводился в звукоизолированном помещении. Акустические сигналы регистрировались в частотном диапазоне до 25 кГц. Регистрация звука осуществлялась контактным пьезодатчиком, который непосредственно касался образца пористой среды. Близкое расположение

Таблица 1. Характеристики образцов пористых сред (пористость, проницаемость и плотность породы)

Номер образца	Тип керна	Пористость, %	Проницаемость, мД	Плотность породы, кг/м ³
31	Карбонатный	22.46	3189.8	2670
1342-11	Карбонатный	14.2	877.5	2710
1342-33	Карбонатный	15.88	6779	2710
2012-11	Карбонатный	13.65	598.25	2690
2012-13	Карбонатный	11.49	438.6	2700
2012-61	Карбонатный	15.79	1116.8	2660
203-76	Карбонатный	16.8	1994.1	2690
817-122	Карбонатный	26.97	4386.3	2810
817-124	Карбонатный	9.83	119.65	2800
133-6	Терригенный	20.58	602.4	2690
4021-101(6)	Терригенный	27.57	—	2700
4781-48	Терригенный	27	2511.2	2700
5051-51(1)	Терригенный	24.18	283.7	2700

Таблица 2. Гранулометрический состав терригенных образцов

Образец	Гранулометрический состав терригенных пород, %							
	промытый вес	менее 0.01 мм	0.01–0.05 мм	0.05–0.1 мм	0.1–0.25 мм	0.25–0.5 мм	0.5–1 мм	Нерастворимый остаток
133-6	2.37	1.29	2.36	42.02	42.14	9.62	—	24.28
4021-101(6)	1.58	0.82	14.93	70.93	8.06	2.93	—	1.41
4781-48	4.82	10	1.01	80.86	2.09	1.01	—	1.76
5051-51(1)	0.13	—	1.57	68.8	27.8	1.46	—	0.41

пъезодатчика и образца исключало возможное затухание шума фильтрации.

В качестве пористой среды были выбраны терригенные и карбонатные образцы коллекторов месторождений нефти Татарстана с различными фильтрационными свойствами диаметром 25 мм и высотой 30 мм. Фильтрационные свойства образцов были определены в лабораториях Института геологии и нефтегазовых технологий (ИГиНГТ) Казанского (Приволжского) федерального университета. Для каждого образца проводился следующий комплекс лабораторных исследований:

– определение пористости образца газовольметрическим методом и методом Преображенского [13];

– определение газопроницаемости [14];

– определение гранулометрического состава образца [15].

Значения пористости, проницаемости и плотности образцов пористых сред представлены в табл. 1. В табл. 2 представлено распределение гранул терригенных образцов по размеру. Выборку образцов пористых сред можно считать репрезен-

тативной ввиду того, что образцы обладают достаточно широким разбросом фильтрационных характеристик образцов.

Схема лабораторной установки представлена на рис. 1. Образец пористой среды цилиндрической формы 4 помещался в кернодержатель, представляющий собой армированный резиновый шланг. Перепад давления на образце создавался при помощи компрессора 1, воздух с которого подавался в буферную емкость 2. Входное давление фиксировалось при помощи образцовых манометров 5, 6. При открытии вентиля 3 сжатый воздух приходил в движение согласно перепаду давления и фильтровался через пористую структуру образца, далее выходил в атмосферу.

Регистрация шумов фильтрации осуществлялась при помощи контактного микрофона Cherub WCP-80G (7). Сигнал с микрофона поступал на микрофонный усилитель Behringer Euroack UB1002 (8), далее на анализатор спектра ZetLab ZET 017-U4 (9) и далее на ноутбук 10, где осуществлялось визуальное наблюдение спектров фильтрационных шумов.

При открытии вентиля 3 перед образцом пористой среды 4 создается давление, равное давлению в компрессоре 1 и буферной емкости 2, и начинается процесс фильтрации. Регистрация фильтрационных шумов осуществлялась при нескольких значениях перепада давления для каждого образца пористой среды.

В программе Cool Edit Pro зарегистрированный акустический сигнал при помощи фурье-анализа преобразовывался в амплитудно-частотный спектр.

В целях уменьшения шумов установки между образцом пористой среды и буферной емкостью газ проходил по длинному шлангу. Также для снижения уровня фонового шума при обработке экспериментальных данных составляющие спектра фонового шума удалялись из регистрируемого фильтрационного шума.

Отличительной особенностью разработанной лабораторной установки от лабораторного стенда, используемого в работах [16, 17], является применение резинового кернодержателя вместо металлического, что позволяет уменьшить отражение акустического сигнала от стенок кернодержателя, тем самым повышая надежность получаемых экспериментальных данных.

Предварительно было установлено, что в диапазоне от 4 до 10 кГц АЧХ измерительных приборов гладкая и не имеет резких максимумов и минимумов. Средняя чувствительность контактного микрофона без усилителя в диапазоне частот 1–10 кГц составила 0.004462 мВ/Па, этого же микрофона с усилителем 0.0643 мВ/Па, а в диапазоне частот от 4 до 10 кГц – 0.00261 и 0.0491 мВ/Па соответственно. Уровень шума микрофонного усилителя в отсутствие сигнала с микрофона составляет 1.44 мкВ.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Спектры шумов фильтрации воздуха через образцы естественных кернов весьма разнообразны. Информативная часть всех полученных спектров (расположение максимумов интенсивности звука) лежит в диапазоне до 10 кГц. В спектрах шумов фильтрации присутствуют один или несколько максимумов, эти максимумы могут также различаться по ширине и интенсивности звука.

Исследование влияния типа коллектора на спектр шумов фильтрации газа

Основным отличием спектров шумов фильтрации воздуха через терригенные образцы от спектров шумов фильтрации воздуха через карбонатные образцы является то, что спектры шумов фильтрации газа через карбонатные образцы более широкие и “изрезанные”, неровные (рис. 2 и 3).

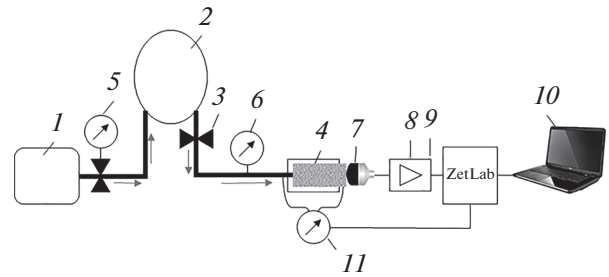


Рис. 1. Схема лабораторной установки.

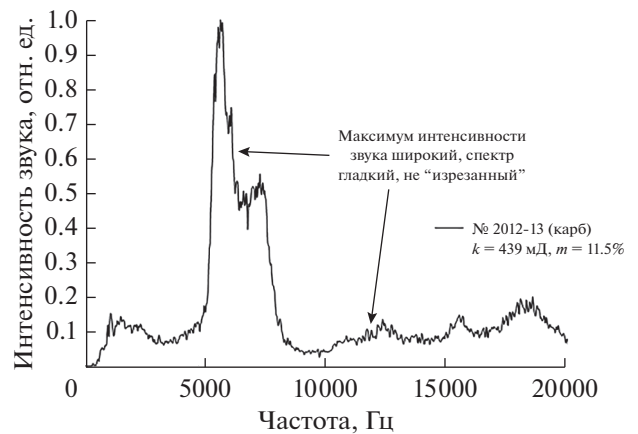


Рис. 2. Спектр шумов фильтрации воздуха через карбонатный образец № 2012-13.

Широкий спектр шумов фильтрации у карбонатных образцов также отмечают и другие коллективы авторов. Например, в работе [21] авторы исследовали спектры шумов фильтрации газа через искусственные образцы Grey Berea, Buffalo Berea и Indiana Limestone. Из спектральной картины видно, что спектр акустического шума для карбонатного образца Indiana Limestone значительно шире, чем для песчаника Buffalo Berea. Узкий спектр у песчаных образцов наблюдается также в работе [16].

Также важно отметить, что в работах [16, 17, 21] максимумы акустических сигналов были зарегистрированы в диапазоне частот 3–10 кГц. В настоящей работе максимумы интенсивности акустического сигнала расположены в аналогичном диапазоне.

Среди выборки присутствовали образцы, у которых фильтрационные характеристики различны, однако спектральные картины их шумов фильтрации схожи (одинаковое положение и величина максимума интенсивности звука). Примеры таких спектров представлены на рис. 4 и 5.

По виду спектральной картины можно предположить, что несмотря на различие фильтраци-

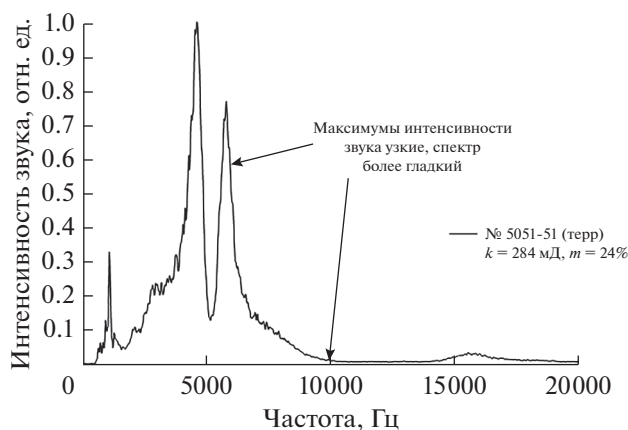


Рис. 3. Спектр шумов фильтрации воздуха через терригенный образец № 5051-51.

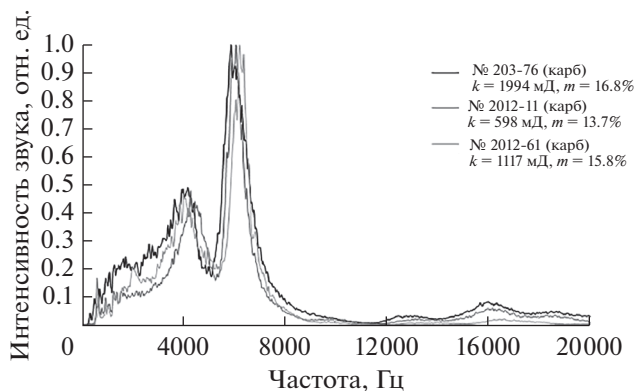


Рис. 4. Спектры шумов фильтрации воздуха через карбонатные образцы № 203-76, 2012-11 и 2012-61.

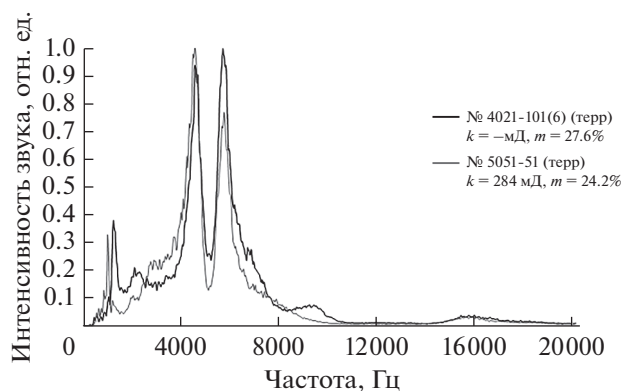


Рис. 5. Спектры шумов фильтрации воздуха через терригенные образцы № 4021-101(6) и 5051-51(3).

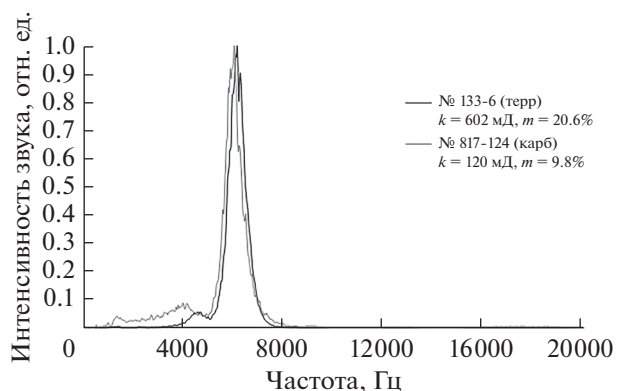


Рис. 6. Спектры шумов фильтрации воздуха через терригенный образец № 133-6 и карбонатный образец № 817-124.

онных свойств, у каждой из групп образцов схожая геометрия фильтрационных каналов.

В выборке также присутствовали образцы терригенного и карбонатного кернов, у которых обнаружили схожие спектры шумов фильтрации (рис. 6). Из этих спектров можно сделать вывод, что положение и величина максимума интенсивности звука не зависит от типа коллектора. Однако, как уже говорилось ранее, тип коллектора будет влиять на "гладкость" спектра. В случае фильтрации газа через терригенный образец № 133-6 спектр шума более ровный, чем спектр шума фильтрации газа через карбонатный образец № 817-124.

Исследование зависимости характера спектра шума от изменения скорости фильтрации газа через образец пористой среды

В рамках данного направления регистрация фильтрационных шумов на образцах осуществля-

лась при различной скорости фильтрации, которая определялась перепадом давления на образце пористой среды. Изменение спектра фильтрационных шумов представлено на рис. 7. Из спектральной картины видно, что при увеличении перепада давления на образце (и, следовательно, скорости фильтрации газа) характер спектра (то есть частоты, на которых возникают максимумы) не меняется, а изменяется только интенсивность звука. Данный вывод согласуется с результатами ранее проведенных исследований [16, 17].

Определение критерия возникновения фильтрационных шумов в пористых средах

Согласно современным представлениям, причиной возникновения шума при фильтрации флюида через пористую среду можно считать турбулизацию потока. Важно отметить, что такой процесс фильтрации уже не будет являться линейным. Для описания процесса фильтрации мо-

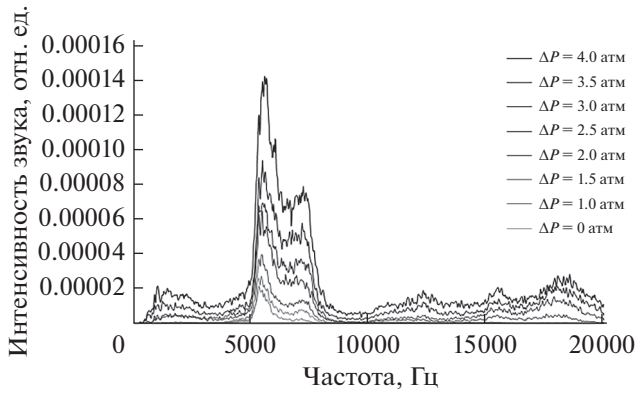


Рис. 7. Спектр шумов фильтрации газа через образец № 2012-13 при различных скоростях фильтрации.

жет быть использован закон фильтрации Форхгеймера. Поток газа может турбулизироваться либо при течении внутри образца, либо при выходе газа из образца в окружающую среду. Для оценки характера каждого течения определялось число Рейнольдса. В классическом представлении число Рейнольдса основано на анализе решения уравнения Навье–Стокса для сплошной среды. В настоящем исследовании вводится число Рейнольдса для пористой среды. Эксперименты проводились при таком перепаде давления, при котором возникают первые слабые акустические сигналы, у которых спектр отличается от спектра фонового шума. Место турбулизации потока флюида, а значит и место возникновения шума определялось путем определения числа Рейнольдса при течении внутри пористой среды и на выходе из образца.

При оценке критического числа Рейнольдса при течении флюида внутри образца пористой среды используется распространенная формула, которая упоминается в работах [18, 19, 22]:

$$Re = \frac{10\nu\rho\sqrt{k}}{m^{2/3}\mu}, \tag{2}$$

где ν – скорость течения флюида, ρ – плотность газа, k – проницаемость образца, m – пористость, μ – динамическая вязкость. Критическое число

Рейнольдса при таком течении согласно [18, 20] принимает значение в диапазоне 1–12.

Для определения числа Рейнольдса на выходе из образца использовалась распространенная формула для течения флюида внутри трубы:

$$Re = \frac{Q\rho D_{эф}}{\mu S_{эф}} = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \frac{Q\rho}{\mu\sqrt{S_{эф}}}, \tag{3}$$

где Q – расход флюида, ρ – плотность флюида, μ – вязкость, $D_{эф}$ – гидравлический диаметр, $S_{эф}$ – эффективная площадь сечения “трубы” (понятие “труба” взято в кавычки, так как фактически течение осуществляется по каналам внутри образца пористой среды). В формуле (3) учтено, что “труба” имеет круглое сечение.

Рассмотрим величину $S_{эф}$. Это та площадь, через которую осуществляется фильтрация флюида. Последняя осуществляется не по всей площади поперечного сечения образца $S_{обр}$, а только по фильтрационным каналам. В работе [22] показано, что для решения различных практических задач можно использовать формулу

$$S_{эф} = mS_{обр}, \tag{4}$$

где m – пористость образца. Ввиду этого получаем расчетную формулу для числа Рейнольдса при течении на выходе из образца:

$$Re = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \frac{Q\rho}{\mu\sqrt{mS_{обр}}}. \tag{5}$$

Критическое число Рейнольдса при таком течении принимает значения около 1000. Результаты расчетов приведены в табл. 3. Эти данные показывают, что в проводимых экспериментах поток газа внутри образца был турбулентный, в то время как на выходе поток можно считать ламинарным. Если придерживаться теории, при которой акустические шумы возникают вследствие турбулизации потока, то можно сделать вывод, что первые слабые акустические шумы в первую очередь возникают именно внутри пористой среды, а не на границе раздела двух сред. Однако нельзя исключать возможность того, что при высоких скоростях течение на границе раздела двух сред перестает быть ламинарным. Возникающая турбу-

Таблица 3. Числа Рейнольдса при фильтрации газа

Номер образца	Течение внутри образца		Течение на выходе из образца	
	Re	Re _{кр}	Re	Re _{кр}
817-124	8		897	
1342-11	11		896	
1342-33	24	1–12	844	1000
2012-11	12		1050	
2012-61	8		700	

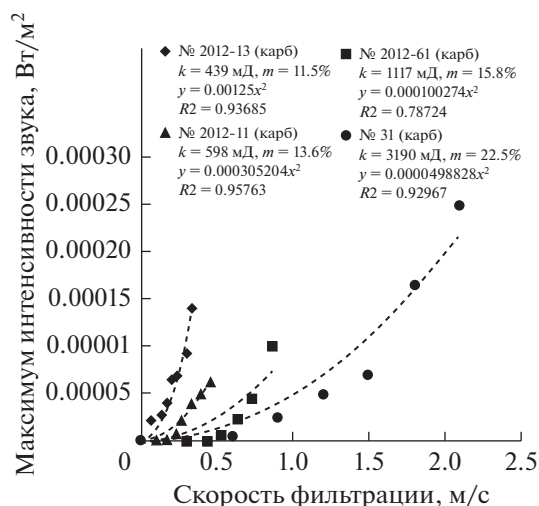


Рис. 8. Зависимость максимума звуковой интенсивности от скорости фильтрации газа для различных образцов.

лентность также может вносить вклад в спектр фильтрационных шумов.

Исследование изменения величины максимума в спектре фильтрационных шумов от скорости фильтрации газа

Для проведения данного исследования для ряда образцов была проведена регистрация фильтрационных шумов при различной скорости фильтрации газа. В спектральных картинах, аналогичных рис. 7, выбирался максимум спектра при каждом значении скорости фильтрации газа. Далее строилась зависимость величины максимума в спектре от скорости фильтрации газа через образец. Скорость фильтрации газа через образец определялась величиной перепада давления на образце пористой среды. Примеры зависимости величины максимума в спектре фильтрационных шумов от скорости фильтрации газа представлены на рис. 8. Из графика видно, что для образцов № 31 и № 2012-61 существует такое ненулевое значение скорости фильтрации, при котором контактный

Таблица 4. Характеристики образцов пористой среды

Номер зерна	Пористость, %	Проницаемость, мД
1342-11	14.2	877
2012-11	13.7	598
817-122	27	4386
4781-48	27	2511
2012-61	15.8	1117
1342-33	15.9	6779

микрофон не регистрирует акустические сигналы. В проведенном эксперименте такое поведение зависимости величины максимума в спектре фильтрационных шумов от скорости фильтрации газа можно объяснить наличием порога чувствительности контактного микрофона. Ввиду этого экспериментальные данные аппроксимировались функциональной зависимостью вида $y = Ax^2$. Аналогичной функциональной зависимостью аппроксимировались экспериментальные данные в работе [16].

Из рис. 8 видно также, что при одинаковой скорости фильтрации интенсивность звука будет больше у образцов, обладающих меньшей проницаемостью и пористостью. Полученный результат можно объяснить исходя из следующих соображений. Проницаемость образцов пористой среды характеризует способность пористой среды фильтровать через себя флюид. Чем больше проницаемость образца пористой среды, тем проще газу просачиваться через образец. Это соответствует тому, что у образца с большой проницаемостью фильтрационные каналы шире, чем у образца с малой проницаемостью. При фильтрации газа через образец пористой среды фильтрационные потоки турбулизируются, что и приводит к генерации акустических волн. Пусть $D_{\text{канал}}$ — характерный размер фильтрационного канала, а $D_{\text{турб}}$ — характерный размер турбулентности. Отношение $D_{\text{турб}}/D_{\text{канал}}$ для образцов с большой проницаемостью будет меньше, чем для образцов с малой проницаемостью. Соответственно, у пористых сред с большой проницаемостью турбулентность потока будет оказывать меньшее влияние на колебания давления газа на контактный микрофон и, соответственно, контактный микрофон будет регистрировать колебания давления с меньшей амплитудой.

Исследование влияния фильтрационных свойств коллекторов нефти и газа на характер спектров шумов

Для данного исследования были выбраны пары образцов с близкой пористостью и разной проницаемостью и проведено сравнение спектров. Характеристики выборки образцов представлены в табл. 4. Сравнение спектров фильтрационных шумов приведено на рис. 9–11. Показанные на рисунках спектры свидетельствуют о том, что спектральная картина шумов фильтрации газа через образцы пористой среды не определяется пористостью образцов. Одинаковые значения пористости у образцов не означают, что расположение и величина максимумов в спектре шумов фильтрации будут одинаковыми.

В работе [17] отмечается, что с увеличением проницаемости образца пористой среды макси-

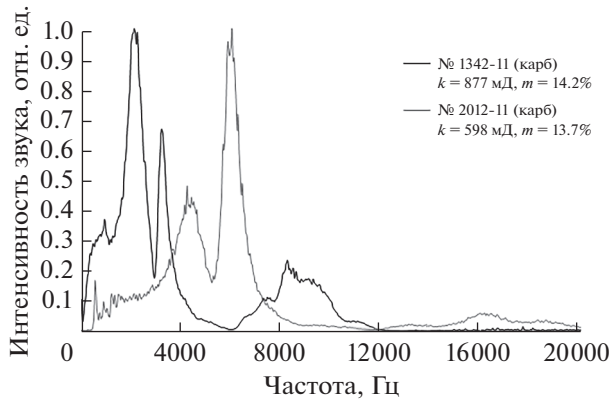


Рис. 9. Спектры фильтрационных шумов образцов № 1342-11 и 2012-11.

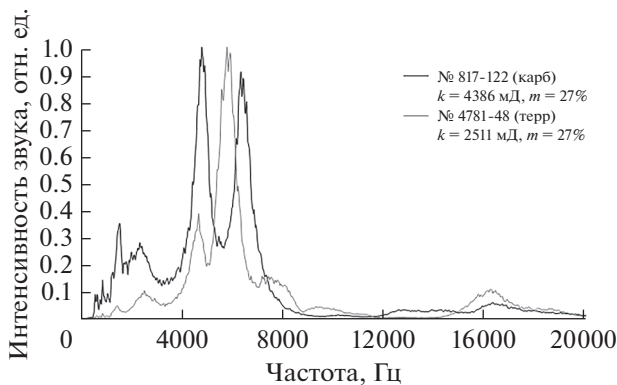


Рис. 10. Спектры фильтрационных шумов образцов № 817-122 и 4781-48.

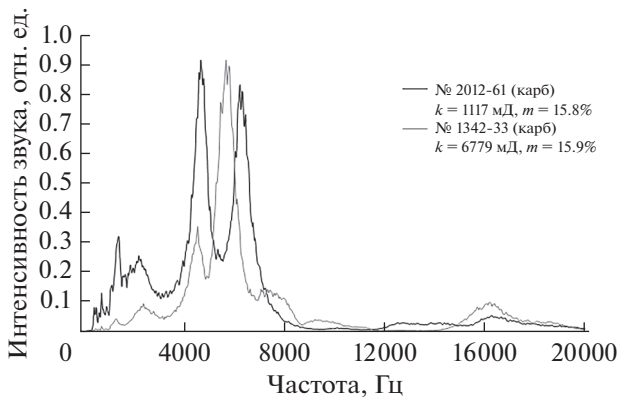


Рис. 11. Спектры фильтрационных шумов образцов № 2012-61 и 1342-33.

мум в спектре шумов фильтрации сдвигается в область высоких частот. Данный вывод был получен для искусственных образцов (аналоги естественных терригенных образцов). В настоящей работе данный вывод удалось проверить только

на карбонатных образцах. Из рис. 9 и 11 видно, что с ростом проницаемости образца расположение максимума в спектре действительно изменяется, однако четко выделить направление сдвига нельзя (в одном случае максимум сдвигается в область низких частот, в другом — в область высоких частот). Исходя из этого можно сказать, что вывод, полученный в работе [17], на карбонатных образцах не подтвердился. Необходимо проведение дополнительного исследования на естественных образцах терригенного типа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современных представлений о механизме генерации звука показывает, что движение газа под действием перепада давления на концах образца пористой среды осуществляется по фильтрационным каналам. Фильтрационный канал в пористой среде — это разветвленный лабиринт, который может иметь различную геометрию. Поток газа в этом лабиринте может резко изменять направление движения, а также разветвляться в зависимости от геометрии фильтрационного канала. Такое движение не может не сопровождаться турбулизацией потока газа. Турбулентные потоки вызывают колебания давления, которые регистрирует контактный микрофон. Данный механизм звукообразования подтверждается настоящим экспериментальным исследованием. Анализ экспериментальных данных показал, что шумы фильтрации могут быть обусловлены турбулизацией потока флюида как внутри образца пористой среды, так и на выходе из образца (на границе раздела пористая среда—воздух).

Проведенное исследование подтвердило ранее полученный вывод, что скорость фильтрации флюида оказывает влияние только на амплитуду спектра. Также подтвердилась квадратичная зависимость величины максимума звуковой интенсивности в спектре шумов фильтрации от скорости фильтрации газа.

Установлено, что на вид спектра шумов фильтрации газа оказывает влияние тип коллектора образца пористой среды. Показано, что образцам с различными фильтрационными свойствами могут соответствовать спектры со схожими расположением и величинами максимумов звуковой интенсивности. Показано также, что образцам со схожими фильтрационными характеристиками могут соответствовать совершенно различные по виду спектры шумов фильтрации. Данный вывод подтверждает, что геометрия фильтрационного канала, несомненно, влияет на фильтрационные свойства породы, однако однозначно установить связь между геометрией фильтрационного канала и фильтрационными характеристиками породы нельзя. На основании этого можно предположить, что акустический каротаж не дает одно-

значного определения фильтрационных свойств по спектрам шумов фильтрации флюида через коллектор. Для проверки данного предположения необходимо дополнительно проводить исследования в пластовых условиях, а также исследовать фильтрацию многофазных флюидов. Кроме того, предметом дальнейших исследований является анализ шумов, возникающих при фильтрации флюидов через искусственные образцы пористых сред, изготовленных на 3D-принтере или методом спекания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гик Л.Д. Методы изучения трещин и пор горных пород на основе данных акустического каротажа // Физическая мезомеханика. 2008. № 4. С. 67–73.
2. Кузнецов Ю.И. Акустический каротаж как возможный метод исследования трещиноватости горных пород // Каротажник. 2017. № 2(272). С. 95–107.
3. Дрягин В.В., Иванов Д.Б., Черных И.А., Шумилов А.В. Каротаж акустической эмиссии в цикле повышения нефтеотдачи и контроля источников обводнения месторождения // Каротажник. 2014. № 10(244). С. 57–64.
4. Афанасьев Е.Ф., Грдзелова К.Л., Плющев Д.В. Об источниках генерации звука в насыщенных флюидом пористых средах // Докл. АН СССР. 1987. № 3. С. 554–557.
5. Овчинников М.Н., Каримов Ф.Ф., Николаев А.С. Акустический контроль гидродинамических потоков в скважинах // Георесурсы. 2001. № 1. С. 31–32.
6. Ипатов А.И., Городнов А.В., Петров Л.П., Шумейко А.Э., Скопинцев С.П. Апробация метода анализа амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при оценке фильтрации флюидов в породах // Каротажник. 2004. № 9(122). С. 51–66.
7. Ипатов А.И., Городнов А.В., Ипатов С.И., Марченко Н.Н., Петров Л.П., Скопинцев С.П. Исследования амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах // Геофизика. 2004. № 2. С. 25–30.
8. DiCarlo D.A., Cidoncha J.I.G., Hickey C. Acoustic measurements of pore-scale displacement // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 17. doi 10.1029/2003GL017811
9. Иванова Э.А., Михайлов Д.Н. Резонансы внутри ансамбля пор как возможная модель формирования спектра акустического излучения при фильтрации газа через пористые среды // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 5. С. 1750805.
10. Дрягин В.В. Сейсмоакустическая эмиссия нефтепродуктивного пласта // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 744–751.
11. Лавров А.В., Шкуратник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 1. С. 2–11.
12. Mikhailov D.N., Nikolaevskii V.N. Dynamics of flow through porous media with unsteady phase permeabilities // Fluid Dynamics. 2000. V. 35. № 5. P. 715–724.
13. ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением. Введ. с 30.06.86. М.: Издательство стандартов, 1986. 8 с.
14. ГОСТ 26450.2-85. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. Введ. с 27.02.85. М.: Издательство стандартов, 1985. 17 с.
15. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Введ. с 01.07.15. М.: Издательство стандартов, 2015. 19 с.
16. Марфин Е.А., Метелев И.С., Гарифьянов Б.А., Абдрашитов А.А. Исследование спектров фильтрационных шумов // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2014. № 6. С. 146316.
17. Марфин Е.А., Кирпичникова Т.А., Метелев И.С. Особенности спектров фильтрационных шумов в естественных и искусственных пористых средах // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 5. С. 1751407.
18. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромышленной геологии и разработки трещиноватых коллекторов. Пер. с англ. Бардиной Н.А., Голованова П.К., Власенко В.В., Покровского В.В. / Под ред. Ковалева А.Г. М.: Недра, 1986. 608 с.
19. Басниев В.С., Дмитриев Н.М., Розенберг Г.Д. Нефтегазовая гидромеханика. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 544 с.
20. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Каневская Р.Д., Максимова В.М. Подземная гидромеханика. М.: Институт компьютерных исследований, 2006. 488 с.
21. Sergeev S.I., Ryzhikov N.I., Mikhailov D.N. Experimental study of noise induced by single-phase flow in rocks // Saint Petersburg 2018: Innovations in Geosciences, Time for Breakthrough. doi 10.3997/2214-4609.20180030
22. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. М–Л.: Гостоптехиздат, 1949. 525 с.