

Исследование спектров фильтрационных шумов

Е.А. Марфин^{1,*}, И.С. Метелёв^{2,†}, Б.А. Гарифьянов^{2,‡}, А.А. Абдрашитов^{1,§}¹Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра Российской академии наук, Россия, 420111, Казань, Лобачевского, д. 2/31²Казанский федеральный университет, институт физики, кафедра радиоэлектроники, Россия, 420111, Казань, Кремлёвская, д. 16а
(Статья поступила 14.11.2014; Подписана в печать 08.12.2014)

Движение жидкостей и газов сквозь пористые среды сопровождается генерацией акустических колебаний — фильтрационных шумов. Спектры таких шумов зависят от свойств жидкостей и пористого коллектора, а также режима течения. В работе представлены результаты лабораторных экспериментов по исследованию спектральных характеристик фильтрационных шумов, генерируемых потоком сжатого воздуха, фильтруемого через образец пористой среды реального месторождения. Описаны конструктивные особенности экспериментальной установки и детали проведенного исследования. Выявлена взаимосвязь основных частот и амплитуд генерируемых колебаний с режимом течения. Представлены визуальные картины спектра фильтрационных шумов. Полученные результаты могут быть использованы в решении идентификационных задач по определению свойств и работающих интервалов продуктивных пластов.

PACS: 43.25.Nm, 43.28.Py, 47.56.+g УДК: 534-18, 534.632

Ключевые слова: пористая среда, фильтрация, фильтрационные шумы, спектр, частота, амплитуда, проницаемость, перепад давления.

ВВЕДЕНИЕ

При фильтрации жидкости или газов через пористые среды возможна генерация звуковых колебаний [1, 2]. Это явление является одним из видов акустической эмиссии, сопровождаемой многие физические процессы, как в твердых телах, так и в насыщенных пористых средах. Проблема фильтрационного шумообразования имеет прикладной и фундаментальный аспекты. Теоретическое исследование процесса возбуждения упругих волн в скелете пористой среды при фильтрации газа сквозь пористой материал выполнено в работе [3]. Исследования гидродинамических шумов (шумометрия) в скважинах позволяют решать различные технологические задачи, по которым традиционные геофизические методы (термометрия, расходомерия и т. д.) не всегда дают однозначные ответы.

Интенсивность гидродинамического шума нелинейным образом зависит от скорости потока, и характер этой зависимости, равно как и частотное распределение шумов, определяется физической природой гидродинамических источников звука. Основываясь на экспериментальных исследованиях гидродинамического звукообразования в скважине, спектр шума потока можно разделить на три частотные полосы [4]. Поток жидкости в трубах (колонна, НКТ) создает шум в полосе частот до 100 Гц. При движении потока по кавернозным и трещиноватым средам спектр шумов имеет максимум в пределах от 100 до 2000 Гц. Спектр шума

фильтрационного потока в породах-коллекторах лежит в полосе 2–20 кГц.

Отмеченные закономерности гидродинамического звукообразования в скважине позволяют с помощью спектрального анализа шумов различных источников определить режим течения жидкости и местоположение потока, в том числе выявить работающие интервалы пластов, в том числе на неперфорированных участках, заколонные перетоки, микроциркуляцию между пластами, а также контролировать техническое состояние скважины и подземного оборудования.

Источниками гидродинамического шума являются неоднородности потоков жидкости в скважине и пласте, возникающие из-за турбулизации потока жидкости при взаимодействии с поверхностью твердого тела или препятствиями, а также при фильтрационном режиме течения жидкости. Физическая природа звукообразования при турбулентном течении может быть объяснена исходя из анализа следующего дифференциального уравнения. В пренебрежении тепловыми эффектами, волновое уравнение для акустического давления в среде с учетом звукообразования при движении этой среды запишется в виде [5]:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{F}(x, t) - \frac{\partial^2 (\rho u_i u_j - \sigma_{ij})}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

где p — звуковое давление; ρ — плотность жидкости; c — скорость звука в жидкости; Θ — массовый расход, приведенный к единице объема; \mathbf{F} — сила вязкого трения, приведенная к единице объема u_i , u_j — отклонение компоненты скорости элемента жидкости от скорости основного течения; σ_{ij} — тензор вязких напряжений; напряженность элементарных источников звука, с которой колеблющееся тело действует на жидкость.

*E-mail: marfin_ea@mail.ru

†E-mail: igor_metelev@mail.ru

‡E-mail: mus11m@rambler.ru

§E-mail: abdary@mail.ru

В уравнении (1) источниками гидродинамического звукообразования служат элементарные излучатели типа монополей $\left(\frac{\partial\Theta(x,t)}{\partial t}\right)$, диполей $(\text{div}\mathbf{F}(x,t))$, и квадруполей $\left(\frac{\partial^2(\rho u_i u_j - \sigma_{ij})}{\partial x_i \partial x_j}\right)$. При этом необходимо отметить, что в движущемся потоке жидкости по скважине всегда существуют пульсации гидродинамического давления («псевдозвук», которые могут восприниматься как звук.

Каждый источник звука имеет собственный, характерный для него спектр звуковых колебаний [5]. Спектр интенсивности шума в случае малых скоростей ($V \ll c$) пристеночных течений располагается в низкочастотной области (до сотен герц) и в значительной степени определяется псевдозвуковыми эффектами. Дипольная составляющая звукового излучения в спектре интенсивности шума расположена в области достаточно высоких частот (тысячи герц). Препятствия для течения жидкости изменяют спектральную картину интенсивности шума. Чем меньше размер препятствия, тем в более высокую область смещается максимум спектра.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования фильтрационных шумов, генерируемых при потоке сжатого воздуха сквозь образец пористой среды. Шум регистрируется с помощью контактного микрофона на поверхности оболочки, внутри которой расположен пористый образец. Особое внимание обращено на амплитудно-частотные характеристики регистрируемого сигнала при различных скоростях фильтрации.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования фильтрационных шумов проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1. Образец пористой среды 1 в виде цилиндра диаметром 25,4 мм и длиной 60 мм помещался внутрь измерительной ячейки с жестким стальным корпусом. Для образцов был взят керновый материал из трещиновато-пористых коллекторов нефтяных месторождений. Пространство между пористым образцом и стенкой измерительной ячейки для исключения перетоков заполнено эпоксидным клеем. Один конец трубы с пористым образцом подключен газовому баллону высокого давления 2 объемом $5,0 \times 10^{-3} \text{ м}^3$ через вентиль 3. Газовый баллон заполнялся воздухом с помощью компрессора до давления 1,0 МПа. При открытии вентиля 3 поток сжатого воздуха через пористый образец выходит из открытого конца в свободную атмосферу. С помощью манометра 4 осуществлялся контроль давления перед пористым образцом. Одновременно перепад давления на образце фиксировался с помощью датчика разности давления 5 типа Сапфир-22-ДД.

Фильтрационные шумы регистрировались с помощью контактного микрофона 6, представляющего со-

бой пьезокерамический датчик и расположенного на измерительной ячейке. Сигнал с микрофона подавался на предварительный усилитель 7 и далее через анализатор спектра 8 (Zetlab ZET 017-U4) на компьютер 9. На анализатор спектра также подавался сигнал с датчика разности давления 5. В процессе эксперимента одновременная регистрация двух сигналов позволяет сопоставить спектры фильтрационных шумов с перепадом давления на образце (скоростью фильтрации).

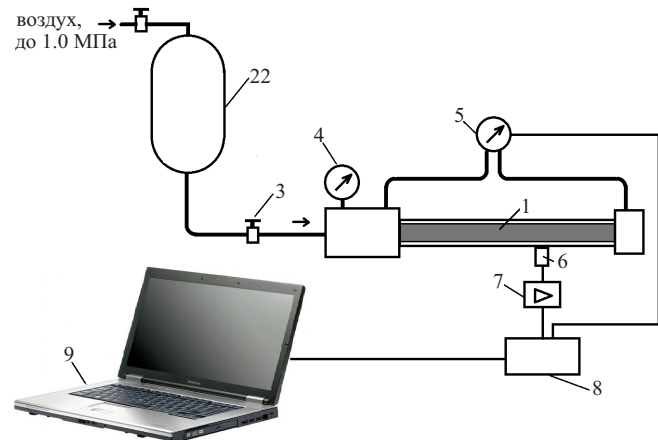


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

При открытии вентиля 3 на пористом образце создается перепад давления и начинается процесс фильтрации. С выходом воздуха из баллона давление перед образцом снижается. По динамике снижения давления (рис. 2) можно судить о фильтрационных свойствах пористой среды. В данном случае скорость фильтрации менялась от 0,05 м/с до 0. Для повышения надежности получаемых результатов и проверке их повторяемости эксперименты дублировались несколько раз.

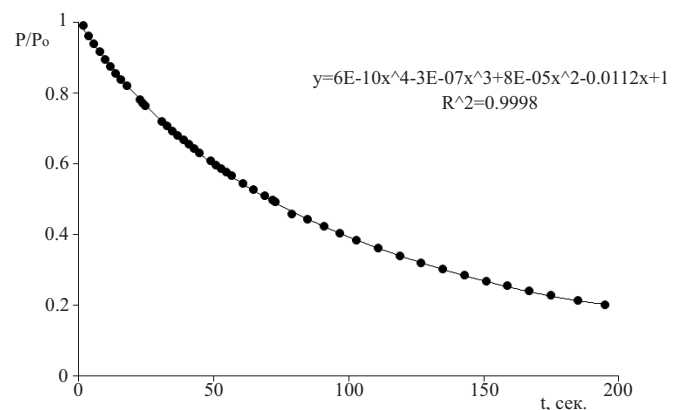


Рис. 2: Динамика падения перепада давления при фильтрации воздуха через пористый образец ($P_0 = 0,73 \text{ МПа}$)

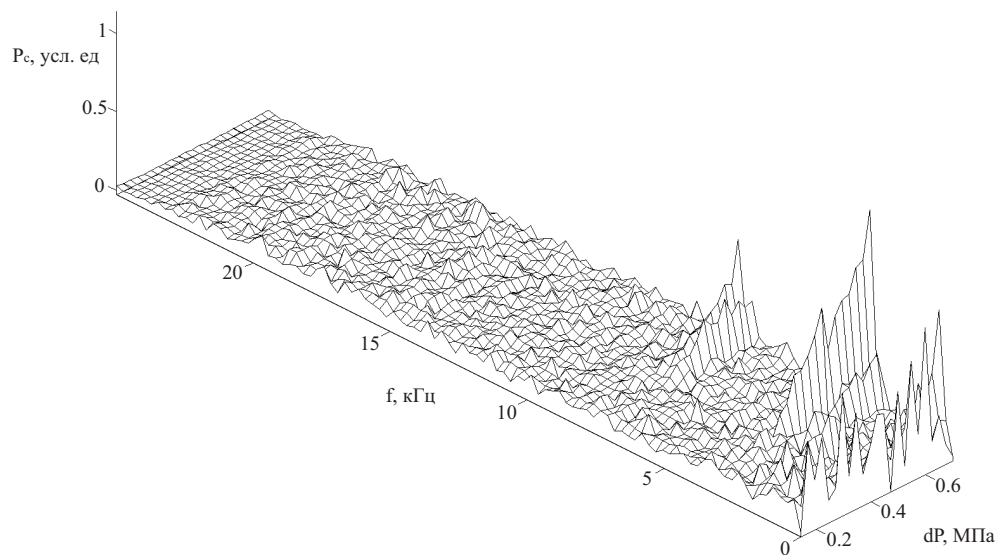


Рис. 3: Спектр характеристика фильтрационных шумов при различных перепадах давления на пористом образце

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Регистрируемый в эксперименте сигнал с микрофона обрабатывался с помощью Фурье-анализа в широкой полосе частот от 10 Гц до 25 кГц. Для снижения уровня фонового шума помимо проведения эксперимента в звукоизолированном помещении использовался метод, реализованный в программе Adobe Audition. Суть этого метода состоит в записи сигнала контактного микрофона в отсутствии фильтрации. В последующем составляющие спектра этого фонового шума удалялись из регистрируемого фильтрационного шума.

Полученные данные позволили построить спектральную картину. Изменение спектр фильтрационных шумов от скорости фильтрации (перепада давления на образце) представлено на рис.3. При больших скоростях потока сразу после открытия вентиля значительный уровень сигнала наблюдается в низкочастотной области до 500 Гц, что, по-видимому, обусловлено турбулентными пульсациями. При уменьшении скорости эти низкочастотные пульсации пропадают, но остаются высокочастотные составляющие вблизи 3 и кГц (рис.3). Характерно то, что частота этих составляющих практически не меняется, а их амплитуда зависит от скорости потока. По амплитуде второй максимум на частоте около 8 кГц примерно в два раза меньше основного на 3 кГц.

Исследование динамики амплитуды колебаний сигналов на выделенных частотах позволил выявить следующую закономерность. На частоте 3,0 кГц амплитуда колебаний имеет квадратичную зависимость (рис.4) от перепада давления на пористом образце. При уменьшении градиента давления ниже 5,0 МПа/м амплитуда этой составляющей не выделяется среди других частот.

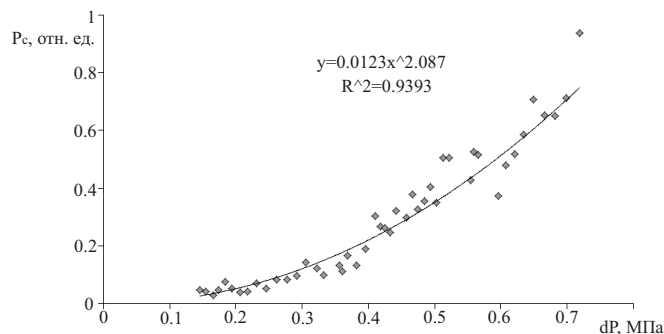


Рис. 4: Зависимость амплитуды колебаний на частоте 3,0 кГц от перепада давления на пористом образце

Полученные экспериментальные данные согласуются с ранее проведенными экспериментами на других образцах породы [6]. Однако, в отличие от прежних данных (рис.5) в спектре фильтрационных шумов выделяются две составляющие, а не одна.

Полученные результаты позволяют для случая низкоскоростных фильтрационных потоков газа в пористых средах предложить следующий механизм звукообразования. Движущийся газ выступает в качестве инициатора звуковых колебаний. Флуктуации давления в ней имеют широкий спектр. Упругий пористый скелет «отбирает» те колебания, частоты которых являются «резонансными» для механических колебаний частиц горной породы, образующих твердый скелет коллектора. Результатом подобного взаимодействия и является возникновение самосогласованных механических колебаний частиц твердого скелета коллектора и частиц жидкости. В рамках такой модели можно объяснить основные закономерности явления звукообразования фильтрационным потоком.

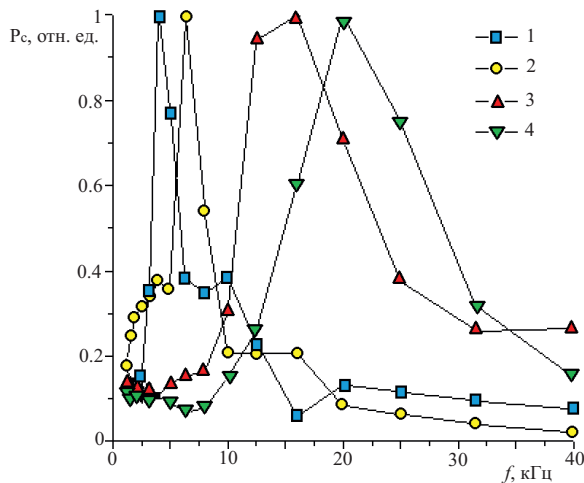


Рис. 5: Типичные спектры шумов фильтрации в различных коллекторах [6] 1 — трещиноватые, 2 — трещиновато-пористые, 3 — пористые карбонатные, 4 — пористые песчанники

Полученные результаты могут быть применены в реализации метода спектральной шумометрии, основанном на изучении звукового поля скважине. Источниками звука с различными спектральными характеристиками могут быть участки с резким изменением скорости и направления потока жидкости, потоки жидкости по трещинам в разрушенном цементном кольце, а также фильтрационные течения флюида в пористой среде насыщенных пластов. Источники различают с частотного разделения сигнала, принимаемого глубинным гидрофоном.

Известен способ контроля гидродинамического потока в скважине [9], включающий замер уровня звукового давления гидродинамического шума по стволу

скважины. При его реализации измеряют максимальные значения уровней звукового давления и соответствующим им частоты гидродинамического шума по стволу скважины, по значению частоты каждого из максимальных уровней звукового давления определяют режимы течения гидродинамического потока в работающей скважине, а по относительному изменению значений уровней соответствующих частот по стволу скважины определяют местоположение режимов течения гидродинамического потока. Таким образом, по диаграмме спектрального шумового каротажа скважин можно выявить характер движения потока и его местоположение. Это позволяет определить работающую толщину пласта, в том числе на неперфорированных участках, заколонные перетоки, межпластовые перетоки в стволе скважины, микроциркуляцию в пластах, интервалы нарушения НКТ и эксплуатационной колонны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы разработана экспериментальная установка по исследованию фильтрационных шумов. Выявлена зависимость амплитуды основных частот спектра фильтрационных шумов от скорости фильтрации воздуха через пористый образец. Полученные результаты могут быть использованы в решении идентификационных задач по определению свойств и работающих интервалов продуктивных пластов, а также при выборе режима акустического воздействия на процесс добычи углеводородов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан (грант №13-08-97078), а также гранта British Petroleum (№ 33-13/4).

- [1] Николаев С.А., Овчинников М.Н. Акуст. журн. **38**, № 1. С. 114. (1992).
- [2] Овчинников М.Н. Завидонов А.Ю. Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования, Москва. **3**. С. 135. (2002).
- [3] Заславский Ю.М. Техническая акустика. № 5. (2005). ta.org.ru.
- [4] Николаев С.А., Овчинников М.Н., Кандаурова Г.Ф., Мельников Н.А. Нефтяное хозяйство. № 2. С. 40. (1992).
- [5] Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях. (М.: Мир, 1981). 598 с.
- [6] Марфин Е.А. Скважинная шумометрия и виброакустиче-

- ское воздействие на флюидонасыщенные пласты: Учебно-методическое пособие. (Казань: Изд-во Казанский университет, 2012). 44 с.
- [7] Афанасьев Е.Ф., Грдзелова К.Л., Плющев Д.В. Докл. АН СССР. № 3. С. 554. (1987).
- [8] Якимов А.С., Хисамов Р.С., Трофанчук Д.С., Николаев С.А., Овчинников М.Н. Нефтяное хозяйство. № 2. С. 50. (1987).
- [9] Николаев С.А., Овчинников М.Н., Николаев А.С. А.с. №1477900 СССР. № 17. С. 121. (1989).

Research of spectra of filtrational noise**E.A. Marfin^{1,a}, I.S. Metelyov^{2,b}, B.A. Garifyanov^{2,c}, A.A. Abdrashitov^{1,d}**¹*Research Center for Power Engineering Problems of the Kazan Science Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan 420111, Russia*²*Institute of Physics, Kazan Federal University, Kazan 420111, Russia**E-mail: ^amarfin_ea@mail.ru, ^bigor_metelev@mail.ru, ^cmasl1m@rambler.ru, ^dabdary@mail.ru*

The movement of liquids and gases through porous environments is accompanied by generation of acoustic fluctuations — filtrational noise. A spectrum of such noises depends on properties of liquids and a porous collector, and also on mode of current. In work results of laboratory experiments on research of spectral characteristics of the filtrational noise generated by a stream of compressed air, filtered through the sample of the porous environment of a real deposit are presented. Design features of experimental equipment and a detail of the conducted research are described. The interrelation of the basic frequencies and amplitudes of generated fluctuations with a current mode is revealed. Visual pictures of a spectrum of filtrational noise are presented. The received results can be used in the decision of identification problems by definition of properties and working intervals of productive layers.

PACS: 43.25.Nm, 43.28.Py, 47.56.+r

Keywords: porous media, filtration, filtrational noise, spectrum, frequency, amplitude, permeability, pressure differential.

Received 14.11.2014.

Сведения об авторах

1. Марфин Евгений Александрович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; тел.: (843) 292-75-05, e-mail: marfin_ea@mail.ru.
2. Метелёв Игорь Сергеевич — студент; тел.: (937) 527-35-34, e-mail: igor_metelev@mail.ru.
3. Гарифьянов Булат Асляхович — студент; тел.: (927) 425-40-72, e-mail: masl1m@rambler.ru.
4. Абдрашитов Алексей Алланович — младший научный сотрудник; тел.: (843) 232-90-21, e-mail: abdary@mail.ru.