

Особенности спектров фильтрационных шумов в естественных и искусственных пористых средах

Е. А. Марфин^{1,*}, Т. А. Кирпичникова^{2,†}, И. С. Метелёв^{2,‡}

¹Казанский научный центр РАН

Россия, 420111, Казань,

ул. Лобачевского, д. 2/31, а/я 261

²Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Институт физики, кафедра радиоэлектроники

Россия, 420111, Казань, ул. Кремлевская, д. 16а

(Статья поступила 04.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Фильтрация флюидов в пористых средах вызывает генерацию гидродинамических шумов. В работе экспериментально исследованы особенности спектральных характеристик таких шумов в различных образцах пористых сред. Используются образцы с различными значениями пористости и проницаемости. Установлена взаимосвязь характерных частот шумов с фильтрационными свойствами пористых кернов. В частности показано, что скорость фильтрации влияет только на интенсивность фильтрационного шума, при этом характерные частоты не меняются. Увеличение проницаемости пористого образца приводит к смещению основного пика в спектре фильтрационных шумов в область высоких частот.

PACS: 43.25.+y, 43.58.+z.

УДК: 534.631, 534.141.4.

Ключевые слова: фильтрационные шумы, акустическая эмиссия, пористая среда, спектр, частота, пористость, проницаемость.

ВВЕДЕНИЕ

Явление генерации звуковых колебаний при фильтрации жидкости или газов через пористые среды известно уже несколько десятилетий [1]. Оно представляет собой один из видов акустической эмиссии, которая сопровождает многие физические процессы, как в твердых телах, так и в насыщенных пористых средах. 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. В этом случае источниками регистрируемых шумов могут быть: турбулентный шум потока жидкости или газа в насосно-компрессорных трубах; течение жидкости через нарушения целостности трубы; заколонные перетоки; фильтрация жидкости в пористых средах; акустическая эмиссия элементов скважины и продуктивных пластов при нагружении и деформации [2]. 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.

Исследования фильтрационных шумов имеют прикладное значение в обосновании режима волнового воздействия на пласт [3, 4]. Волновые методы увели-

чения нефтеотдачи на пласт основаны на интенсификации внутрипластовых процессов наложенными упругими колебаниями. Так, в работе [5] представлены результаты промысловых испытаний волнового воздействия на процесс добычи нефти, которые свидетельствуют об увеличении нефтеотдачи и снижении обводненности извлекаемой жидкости. На основе проведенного анализа промысловых данных в работе [6] установлено, что на частотах волнового воздействия, близких к частотам фильтрационных шумов, наблюдаемый эффект увеличения добычи нефти существенно выше.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования фильтрационных шумов, генерируемых при потоке сжатого воздуха сквозь образцы пористой среды. Особое внимание обращено на амплитудно-частотные характеристики регистрируемого сигнала при различных скоростях фильтрации.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ХОД РАБОТЫ

Экспериментальные исследования проводились на установке, внешний вид которой представлен на рис. 1. Газовый баллон высокого давления 1 заполняется воздухом с помощью компрессора до необходимого давления. С баллона воздух под давлением подается на образец пористой среды 2 через редуктор 3. При открытии редуктора сжатый воздух просачивается через пористую среду и выходит в атмосферу. Входное давление измеряется образцовым манометром 4. Одновременно перепад давления на образце фиксируется с помощью датчика разности давления 5 типа Сапфир-22-ДД.

Регистрация шумов фильтрации осуществляется при помощи контактного микрофона 6, представляющего

*E-mail: marfin_ea@mail.ru

†E-mail: kirptatyana@yandex.ru

‡E-mail: metelev_igor@mail.ru

собой пьезокерамический датчик. Датчик располагается на жестком стальном каркасе. Сигнал с датчика передается на предварительный усилитель 7 и далее через анализатор спектра 8 на ноутбук 9, где осуществляется визуальное наблюдение спектров фильтрационных шумов.

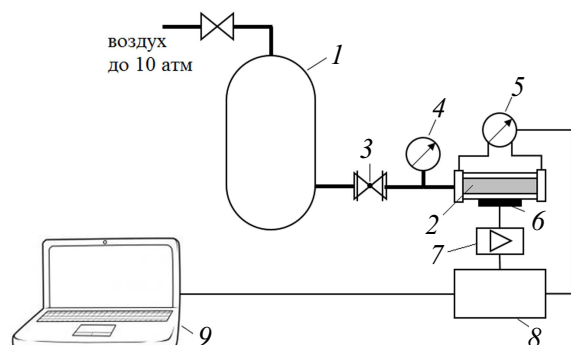


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Регистрируемый в эксперименте сигнал с микрофона обрабатывался с помощью Фурье-анализа в широкой полосе частот от 10 Гц до 60 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.

Типичный пример амплитудно-частотного спектра фильтрационных шумов при различной скорости фильтрации флюида через образец (перепаде давления) представлен на рис. 2. Проведенное исследование показывает, что спектр фильтрационных шумов не зависит от перепада давления на образце (dp), а зависит от внутренней структуры скелета кернов. Структура скелета определяет физические параметры кернов, такие как проницаемость и пористость. Этот вывод согласуется результатами ранее опубликованных данных [7, 8].

Для определения зависимости характера спектров фильтрационных шумов от проницаемости были выбраны образцы с близкими значениями пористости. Для каждого из образцов в спектре определялась частота основного пика. Численные значения свойств пористых образцов и частот основных пиков представлены в табл. 1. Сравнивая образцы №5 и №4, а также №11 и №2, можно сделать вывод о том, что с ростом проницаемости основной пик в спектре фильтрационных шумов сдвигается в область высоких частот.

Таблица 1: Образцы с близкими значениями открытой пористости

№ образца	$m_{полн}, \%$	$m_{отк}, \%$	$k, мД$	Основной пик, Гц
5	15.5	4.2	28.7	700
4	18.4	4.3	48.7	2500
11	23.5	14.5	29.8	450
2	32.4	14.9	315.3	4500

Полученный результат можно объяснить, исходя из следующих соображений. Проницаемость — это фактически сумма площадей поверхностей всех каналов в керне, по которым осуществляется фильтрация. Чем больше проницаемость, тем больше эта площадь. Пусть имеется два керна с одинаковыми геометрическими размерами и близкими значениями пористости. Различие состоит только в значениях проницаемости. Для примера возьмём, что проницаемость у первого керна выше, чем у второго ($k_1 > k_2$). Каждый из этих кернов можно представить в виде набора капилляров, сумма площадей их поверхности равна значению проницаемости. Обозначим d — диаметром капилляра, одинаковым для каждого керна. При этом у первого керна количество таких капилляров окажется больше, чем у второго ($n_1 > n_2$). Соответственно суммарная площадь боковой поверхности стенок капилляров первого керна окажется выше, чем у второго ($\pi d \cdot n_1 \cdot h > \pi d \cdot n_2 \cdot h$). Здесь принято, что h — длина капилляра. Прикладывая к каждому образцу одинаковый градиент давления, получаем, что сила, с которой воздействует флюид на стенки первого образца меньше, чем сила, действующая на стенки второго образца ($p = F_1/S_1 = F_2/S_2$, т.к. $S_1 > S_2$, то $F_1 < F_2$). Поскольку вынуждающая сила $F_1 < F_2$, то по закону упругости получаем, что амплитуда колебаний микрочастиц скелета в первом случае будет меньше, чем во втором ($x_1 < x_2$). Скорости колебания частиц в первом и втором случаях одинаковы, поэтому период одного колебания в первом случае будет меньше, чем во втором ($T_1 < T_2$), и соответственно, частоты колебаний в первом случае будут выше, чем во втором ($f_1 > f_2$).

Аналогичным образом был проведен анализ зависимости характера спектра фильтрационных шумов от пористости. Для определения зависимости характера спектров фильтрационных шумов от пористости были выбраны образцы с близкими значениями пористости (табл. 2). Для каждого из образцов в спектре определялась частота основного пика.

Сравнивая образцы №5 и №11, а также №8 и №10, можно сделать вывод о том, что с ростом пористости (как открытой, так и полной) основной пик сдвигается в область низких частот. Установленная зависимость носит слабо выраженный характер.

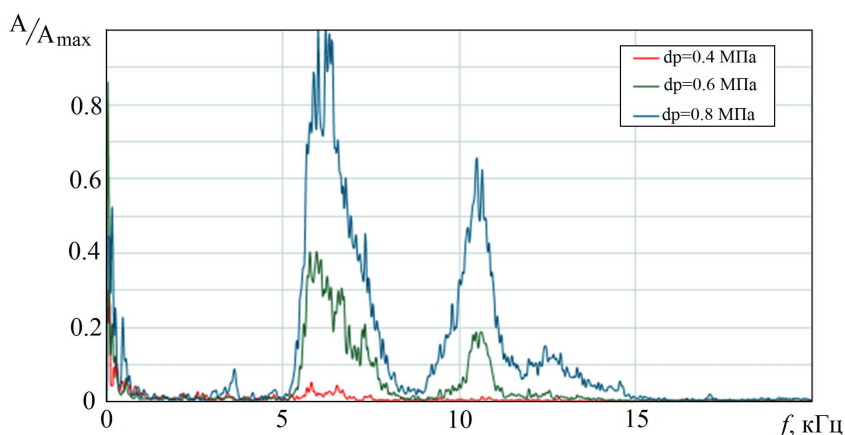


Рис. 2: Спектр фильтрационных шумов при различных перепадах давления

Таблица II: Образцы с близкими значениями проницаемости

№ образца	$m_{полн}, \%$	$m_{отк}, \%$	$k, \text{мД}$	Основной пик, Гц
5	15.5	4.2	28.7	700
11	23.5	14.5	29.8	450
8	22.4	3.8	231.1	3500
10	28.1	20.3	232.3	3000

яет только на интенсивность фильтрационного шума, при этом характерные частоты не меняются. Показано, что увеличение проницаемости пористого образца приводит к смещению основного пика в спектре фильтрационных шумов в область высоких частот. Полученные результаты могут быть использованы в решении идентификационных задач по определению физических свойств и работающих интервалов продуктивных пластов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что скорость фильтрации влия-

ет только на интенсивность фильтрационного шума, при этом характерные частоты не меняются. Показано, что увеличение проницаемости пористого образца приводит к смещению основного пика в спектре фильтрационных шумов в область высоких частот. Полученные результаты могут быть использованы в решении идентификационных задач по определению физических свойств и работающих интервалов продуктивных пластов.

- [1] Николаев С. А., Овчинников М. Н. Акуст. журн. 1992. № 1. С. 114.
 [2] Maslennikova Y. S., Bochkarev V. V., Savinkov A. V., Davydov D. A. SPE. 2012. SPE-162081.
 [3] Beresnev I. A., Johnson P. A. Geophys. 1994. **59**, N 6. P. 1000.
 [4] Гатауллин Р. Н., Кравцов Я. И., Марфин Е. А. Нефтяное хозяйство. 2013. № 1. С. 90.
 [5] Marfin E. A., Kravtsov Y. I., Abdrashitov A. A., Gataullin R. N., Galimzyanova A. R. Petroleum Science and Technology. 2015. 33. N 15–16. P. 1526.

- [6] Marfin E. A., Kravtsov Y. I., Abdrashitov A. A., Metelev I. S. Geomodel 2015 - 17th Scientific-Practical Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development. 2015. P. 116.
 [7] Марфин Е. А., Метелёв И. С., Гарифьянов Б. А. Сб. докл. XI Всеросс. съезда по фундам. пробл. теор. и прикл. механ. 2015. С. 2480.
 [8] Марфин Е. А., Метелёв И. С., Гарифьянов Б. А., Абдрашитов А. А. Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. 2014. № 6. С. 146316.

Features of the spectra of filtration noise in natural and artificial porous media

E. A. Marfin^{1,a}, T. A. Kirpichnikova^{2,b}, I. S. Metelev^{2,c}

¹Kazan Science Center of the Russian Academy of Sciences. Kazan 420111, Russia

²Institute of Physics, Kazan Federal University. Kazan 420111, Russia

E-mail: ^amarfin_ea@mail.ru, ^bkirptatyana@yandex.ru, ^cmetelev_igor@mail.ru

The filtration of fluids in porous media generates hydrodynamic noise. In the paper, the features of the spectral characteristics of such noises in various samples of porous media have been experimentally investigated. Samples with different values of porosity and permeability were used. The relationship between the characteristic noise frequencies and the filtration properties of porous cores

is established. In particular, it is shown that the filtering rate only affects the intensity of the filter noise, while the characteristic frequencies do not change. An increase in the permeability of a porous sample leads to a shift of the main peak in the filter noise spectrum to the high-frequency region.

PACS: 43.25. +y, 43.58. +z.

Keywords: filtration noise, acoustic emission, porous media, spectrum, frequency, porosity, permeability.

Received 04 July 2017.

Сведения об авторах

1. Марфин Евгений Александрович — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (843) 292-75-05, e-mail: marfin_ea@mail.ru.
 2. Кирпичникова Татьяна Андреевна — студент, e-mail: kirptatyana@yandex.ru.
 3. Метелёв Игорь Сергеевич — аспирант, e-mail: igor_metelev@mail.ru.
-