

## Моделирование особенностей спектра акустического шума, инициированного движением флюидов в образцах горных пород

Э.А. Иванова<sup>1</sup>, Д.Н. Михайлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже»

Анализ акустических шумов, генерируемых течением флюидов в образцах горных пород, активно изучается последние десятилетия [1-5]. Рассмотрены различные механизмы генерации такого шума, в частности, формирование вихрей в поровом пространстве, осцилляция гранул породы, пульсация жидкости при течении по порам со случайно меняющейся формой сечения, мобилизация несвязной (остаточной) фазы. Тем не менее, вопрос о выборе физической модели и получении однозначного набора её параметров остается открытым.

Многие экспериментальные данные (например, [3-5]) свидетельствуют о том, что основной частотный диапазон акустического шума слабо зависит от скорости фильтрации и определяется только структурой породы. Данный эффект объясняется резонансом колебаний частиц породы [5] и формированием стоячих волн в длинных поровых каналах [3].

Нами предложена новая модель, основанная на резонансе внутри системы “тело –горлышко пор”, с помощью которой удалось лучше воспроизвести особенности спектра экспериментально зарегистрированного шума. Модель описывает поровое пространство в виде ансамбля взаимосвязанных резонаторов Гельмгольца.

Представлены расчеты собственных частот на примере стохастической модели порового пространства известняка Indiana limestone (средняя пористость 0.12). Согласно [6], распределение пор по размерам (рис. 1) аппроксимируется логнормальным распределением с параметрами  $\sigma^2 = 0.1$ ,  $\mu = 3.7$ . По данному распределению генерируются распределения радиусов тела и горлышек резонатора. Среднее число горлышек, приходящихся на одну пору, определяется координационным числом данной породы.

После того как ансамбль резонаторов сгенерирован, для смещения флюида в горлышке каждого резонатора составляется линейное дифференциальное уравнение второго порядка. Итоговая система дифференциальных уравнений описывает набор гармонических колебаний с собственными частотами, определяемыми соответствующим характеристическим уравнением [7].

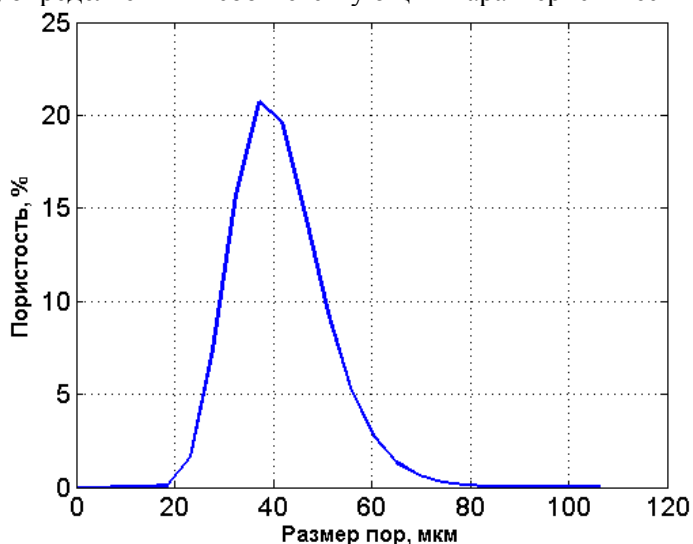


Рис. 1. Распределение пор по размерам в образце известняка Indiana limestone (согласно данным [6]).

Круговая диаграмма (рис. 2с) получена при генерации 1024 поры и 1234 горлышка, что соответствует системе из 1234 ОДУ. На диаграмме представлены доли групп пор с разным количеством горлышек к общему количеству сгенерированных пор.

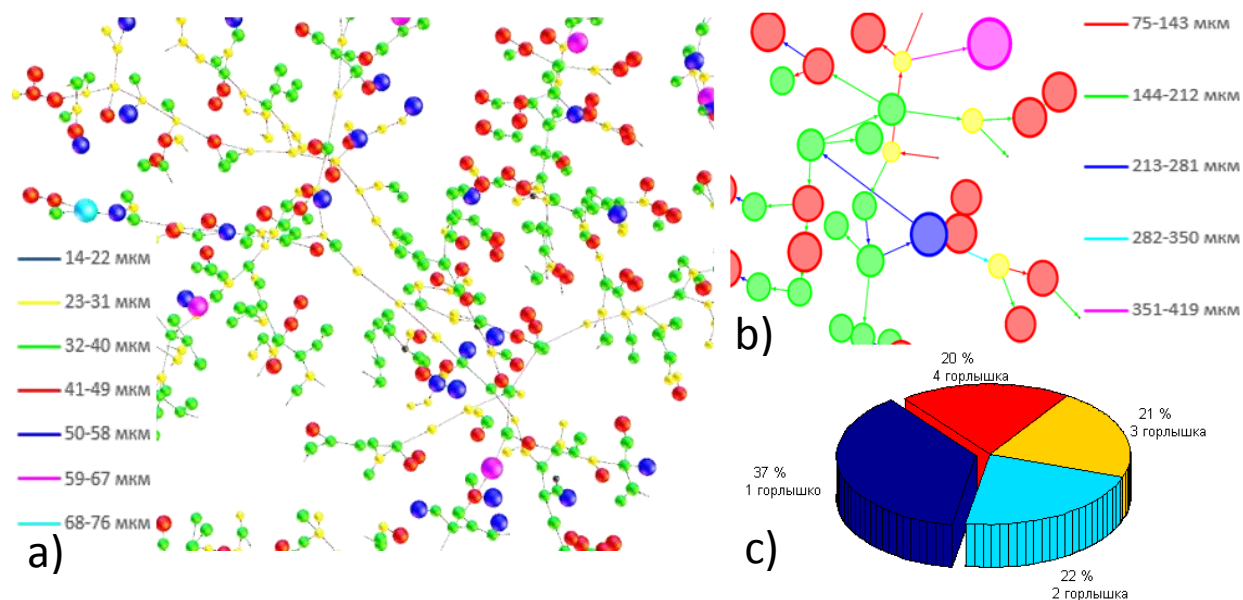


Рис. 2. Сгенерированное поровое пространство визуализировано как ориентированный граф на плоскости; а) узлы разбиты на группы по диапазону радиусов пор (каждый диапазон радиусов соответствует определенному цвету); б) ребра разбиты на группы по диапазону длин горлышек (каждый диапазон длин соответствует определенному цвету); в) доля групп пор с разным количеством горлышек к общему количеству пор.

Гистограмма распределения числа частот, приходящихся на каждые 5 кГц (рис. 3), есть усредненное по 100 реализациям ансамблей резонаторов Гельмгольца, состоящих из 1024 пор с разным количеством горлышек. Из гистограммы видно, что больше всего частот генерируется в диапазоне 10-20 кГц. В среднем на пору приходится 2 горлышка, что соответствует данным [6].

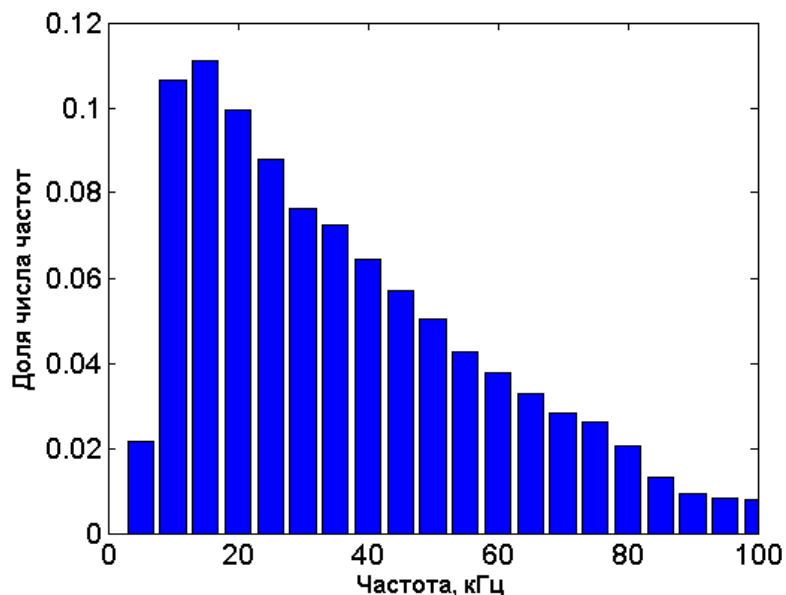


Рис. 3. Гистограмма распределения числа частот, приходящихся на каждые 5 кГц.

Работа выполнена в Московском научно-исследовательском центре Шлюмберже. Авторы выражают благодарность Бурухину А.А., Жарниковой А.В. и Рыжикову Н.И. за помощь при анализе экспериментальных данных.

### Литература

1. *Ипатов А.И., Городнов А.В. и др.* Исследование АЧ спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах. *Геофизика* №2. 2004.
2. *Кортаев Ю.П., Ширковский А.И.* Добыча, транспорт и подземное хранение газа. М: Недра, 1984.
3. *Красновидов Е.Ю.* Создание методики акустико-гидродинамических исследований пористых сред и скважин. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2005.
4. *Овчинников М.Н.* Реологические модели и эволюция физических полей в подземной гидросфере. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Казань. 2004.
5. *Metlev I.S., Marfin E.A., Gaifutdinov R.R.* The use of spectral sound meter in the study of the physical properties of oil and gas reservoirs. 12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics. 2016.
6. *M. Freire-Gormaly et al.* Pore Structure Characterization of Indiana Limestone and Pink Dolomite from Pore Network Reconstructions. *IFP Energies nouvelles* (2016) 71, 33.
7. *Мизгулин В.В. и др.* Основы теории колебаний. Москва «Наука». 1978.