

УДК 534.131.1+532.685

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМА ФИЛЬТРАЦИИ

А. В. Лебедев*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Проведено численное моделирование шума фильтрации в рамках предложенной ранее модели возникновения акустического шума в результате возбуждения автоколебаний разрывного типа. Моделирование выполнено для характерных параметров горных пород–коллекторов. В результате продемонстрировано возникновение частот излучения, наблюдавшихся в экспериментах. Также показано, что из-за нелинейного взаимодействия между элементарными источниками акустического излучения его спектр обогащается за счёт комбинационных частот. В случае дробно-рациональных отношений частот взаимодействующих осцилляторов акустическое взаимодействие может приводить к нелинейной синхронизации элементарных источников излучения.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В 1973 году была опубликована работа [1], в которой обсуждалась информативность амплитудно-частотных спектров акустического шума при изучении характеристик турбулентного течения флюидов в эксплуатационной скважине и заколонном пространстве. Результаты [1] дали толчок к развитию диагностики течения флюида в нефтегазовой промышленности. Анализ низкочастотных акустических шумов в полосе от долей герц до единиц килогерц использовался для диагностики скорости притока флюида из пласта в области, примыкающей к скважине. Анализ шума в диапазоне $5 \div 100$ кГц, который обоснованно связывается с течением флюида в порах, позволяет осуществлять пассивную акустическую диагностику притоков флюида из более удалённых от скважины областей. При этом до настоящего момента времени в качестве источника шума в этих областях рассматривается предложенный в [2] механизм излучения акустических волн турбулентным течением в порах [3–6], что, на взгляд автора данной работы, неверно из-за малости числа Рейнольдса соответствующих течений. Отметим, что течение в самой скважине, являвшееся предметом исследования в работе [1], характеризуется значительными величинами числа Рейнольдса, и генерация шума таким течением действительно связана с турбулентными пульсациями потока флюида.

Схема работы нагнетательной и эксплуатационной скважин в однородной пористой среде («вид сверху») показана на рис. 1, который представляет собой адаптированный рис. 40 из работы [7]. Сплошными линиями со стрелками показаны линии тока, штриховыми линиями отмечены линии равного давления. Давление в точке *A* (исток) больше давления в точке *B* (сток), что заставляет жидкость в порах двигаться в нужном направлении, например выдавливая нефть вверх эксплуатационной скважины *B*. Экспериментам на образцах пористых пород [3, 4] отвечает линия тока в виде прямой, соединяющей точки *A* и *B*.

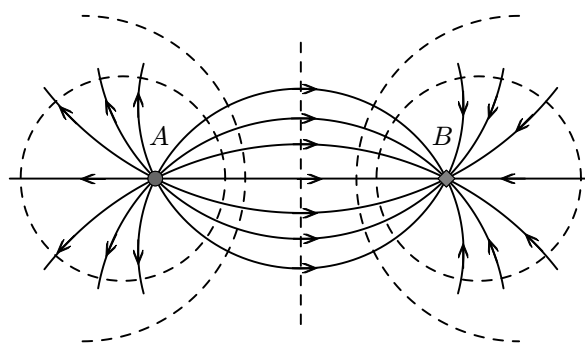


Рис. 1. Схема работы нагнетательной (*A*) и эксплуатационной (*B*) скважин

* swan@appl.sci-nnov.ru

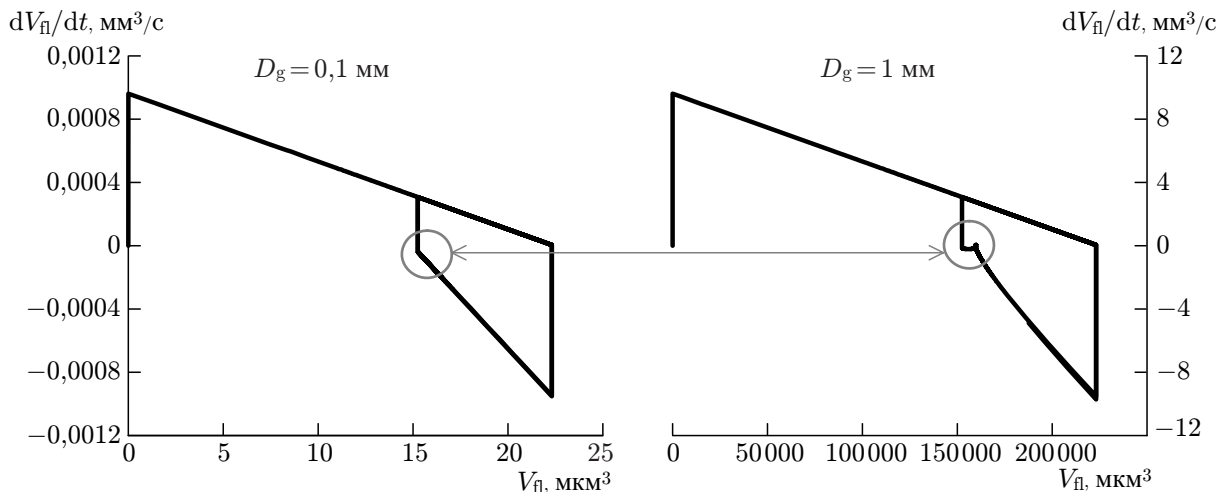
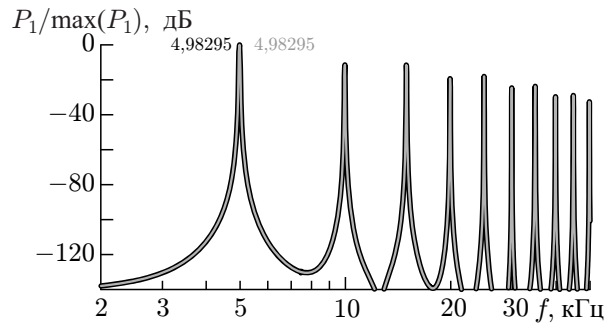
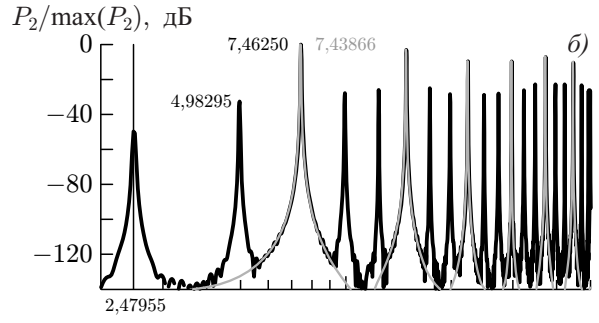
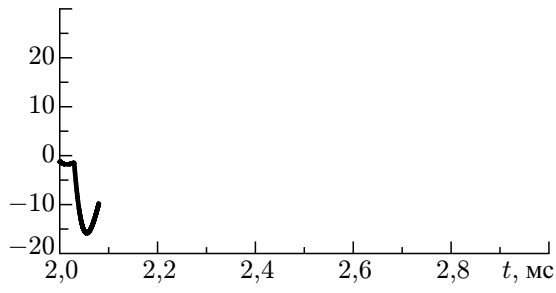


Рис. 7. Фазовый портрет разрывных автоколебаний (отмечены качественные изменения при увеличении D_g)

в песчаниках) распределение размеров зёрен описывается логнормальным законом [27]. Задавая распределение параметров элементарных источников акустического излучения отвечающим распределению зёрен по размерам, получим сплошной спектр излучения с характерной логнормальной зависимостью спектральных амплитуд от частоты, что объясняет наблюдаемые в эксперименте частотные зависимости спектра мощности шума [3, 5, 19].

Амплитуда давления возрастает примерно на три порядка (см. рис. 6б) при увеличении размера зерна на порядок. При этом амплитуда деформации, вызванной акустической волной от источника, становится сопоставимой с пороговыми значениями. Такое поведение является ожидаемым, поскольку объём V_0 , в котором накапливается излишек жидкости, вытекающий затем в основной канал, пропорционален кубу диаметра зерна. Рассмотренный пример показывает, что крупные элементарные источники могут модулировать расположенные рядом источники малых размеров. Отметим также качественное изменение спектрального состава акустического излучения: вклад высокочастотных гармоник становится относительно малым при увеличении D_g . Подобное изменение хорошо согласуется с результатами измерений, из которых следует увеличение характерной частоты акустического шума для мелкозернистых пород-коллекторов по сравнению с крупнозернистыми [3–5].

Сравнение зависимостей $p_0(t)$ для $D_g = 0,1$ мм и $D_g = 1$ мм показывает качественное изменение колебательного процесса. Изменение характера автоколебаний дополнительно иллюстрирует рис. 7, на котором представлен фазовый портрет колебательной системы (параметрическая зависимость \dot{y}_0 от y_0). При увеличении размера зерна и сохранении отношения p_{on}/p_{off} разность $p_{on} - p_{off}$ увеличивается пропорционально размеру зерна (пропорционально градиенту давления в основном потоке флюида, умноженному на характерную длину излучающей звук ячейки). В этом случае успевает проявиться вклад инерции канала, через который излишки жидкости сбрасываются в основной поток: появляются характерные частоты в цепи $\mathcal{L}_1 C_1$ на рис. 3. Этим объясняется изменение характера автоколебаний, видимое на рис. 6 и 7.



Из выражения (18) следует, что давление в полости V_0 , необходимое для открытия канала, обратно пропорционально квадрату характерного размера зерна. Таким образом, при прочих равных условиях первыми открываются каналы, связанные с полостями относительно больших размеров (относительно большие размеры элементарных источников шума фильтрации). Затем «включаются» источники относительно малых размеров. Такое поведение аналогично закрытию сначала протяжённых (крупных) трещин, а затем всё более мелких под действием сил сжатия (см. выражения на странице 60 в [12]).

Вводя гладкую функцию плотности вероятности числа дефектов n в интервале параметров $[\mathcal{R}_c, \mathcal{R}_c + \Delta\mathcal{R}_c]$, $[D_g, D_g + \Delta D_g]$, $[\gamma, \gamma + \Delta\gamma]$, $[p_0, p_0 + \Delta p_0]$, $[\sigma_{\text{int}}, \sigma_{\text{int}} + \Delta\sigma_{\text{int}}]$, а также указанных выше других параметров задачи, т. е. задавая достаточную величину дисперсии распределения по параметрам источников, получим интегральную функцию числа дефектов с близкой к линейной зависимостью от давления p_0 . Поскольку величина p_0 в момент открытия канала пропорциональна градиенту давления ∇p , интенсивность излучения шума оказывается пропорциональной $(\nabla p)^2$, что и наблюдалось в экспериментах [3–5]. Существенное отклонение от этой зависимости возможно при таких величинах ∇p , когда действующее давление способно разорвать значительную часть контактов, т. е. при условии фактического разрушения пористой среды (её дезинтеграции).

Естественно предположить, что относительно крупных по размерам элементарных источников шума фильтрации меньше, чем мелких источников. При этом плотность распределения крупных источников в пространстве должна быть относительно малой, а расстояния между ними относительно большими. Из-за убывания акустического поля (17) обратно пропорционально расстоянию взаимное влияние источников больших размеров окажется маловероятным. По мере увеличения градиента давления основного потока флюида в пористой среде начинают включаться источники малых размеров. Их объёмная концентрация отвечает расстояниям до крупных источников, при которых возможна нелинейная модуляция их колебаний акустическим полем относительно крупных источников.

Следовательно, в эксперименте с ростом градиента давления потока флюида можно ожидать уширения спектра шума фильтрации: появления низкочастотных составляющих, отвечающих комбинационным частотам (рис. 10). Амплитудная зависимость интенсивности шума фильтрации от градиента давления при этом остаётся той же квадратичной функцией до тех пор, пока сама среда сохраняется неразрушенной.

ВЫВОДЫ

Подведём итог и сформулируем основные результаты выполненного исследования.

1. В дополнение к ранее предложенной модели [19] выполнено численное моделирование шума фильтрации, обусловленного возникновением автоколебаний разрывного типа. Определены характерные частоты акустического излучения и амплитуды звукового давления.

2. Показано, что возможно нелинейное акустическое взаимодействие элементарных источников шума. В этом случае источники относительно больших размеров модулируют колебания источников малых размеров. При наличии дробно-рационального соотношения частот автоколебаний возникает нелинейная синхронизация колебаний источников малых размеров. В общем случае спектр излучения источников малых размеров обогащается за счёт появления разностных частот и их гармоник.

3. Предложен способ экспериментальной проверки нелинейного взаимодействия элементарных источников шума фильтрации.

В связи с 85-летним юбилеем автор желает своему учителю Л. А. Островскому долгих лет жизни, насыщенных новыми идеями и оригинальными решениями. Автор выражает благодарность Л. А. Островскому за научные дискуссии и конструктивную критику своих работ, что в немалой степени сформировало его как самостоятельного исследователя.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 18-05-520006, программы президиума РАН «Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов», а также при частичной поддержке госзадания ИПФ РАН по теме 0035-2019-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McKinly R. M., Bower F. M., Rumble R. C. // J. Petrol. Tech. 1973. V. 25, No 3. Art. no. SPE-3999-PA. <https://doi.org/10.2118/3999-PA>
2. Афанасьев Е. Ф., Грдзелова К. Л., Плющев Д. В. // ДАН СССР. 1987. Т. 3. С. 554–557.
3. Николаев С. А., Овчинников М. Н. // Акустический журн. 1992. Т. 38, № 1. С. 114–118.
4. Ипатов А. И., Кременецкий М. И. Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов. М.—Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2010. 780 с.
5. Марфин Е. А. Скважинная шумометрия и виброакустическое воздействие на флюидонасыщенные пласты. Учебно-методическое пособие. Казань : Казанский (приволжский) федеральный университет, 2012. 44 с.
6. Марфин Е. А., Метелёв И. С., Гарифьянов Б. А., Абдрашитов А. А. // Учёные записки физического факультета. 2014. Казанский госуниверситет. Т. 6. С. 146316(1–4).
7. Пыхачев Г. Б., Исаев Р. Г. Подземная гидравлика. М. : Недра, 1973. 360 с.
8. Щелкачев В. Н., Лапук Б. Б. Подземная гидравлика. М. : Государственное научно-техническое из-во нефтяной и горно-топливной литературы, 1949. 525 с. Репринтное издание: Москва—Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 736 с.
9. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. М. : Наука, 1966. 520 с.
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. Т. 6. Теоретическая физика. М. : Наука, 1988. 736 с.
11. Fritz K. R., Hantschk C.-C., Heim S., et al. // Handbook of Engineering Acoustics / ed. by G. Müller, M. Möser. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2013. P. 577–636.
12. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics Handbook. Tools for seismic analysis in porous media. Cambridge : Cambridge University Press, 2009. 524 p.
13. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М. : Недра, 1984. 211 с.
14. Sergeev S. I., Ryzhikov N. I., Mikhailov D. N. // J. Petrol. Sci. and Eng. 2019. V. 172. P. 654–661. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.018>
15. Заславский Ю. М. // Электронный журнал «Техническая акустика». 2005. Т. 5. 11.
16. Мирзаджанзаде А. Х., Хасанов М. М., Бахтизин Р. Н. Моделирование процессов нефтегазодобычи. Нелинейность, неравновесность, неопределённость. Москва, Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004. 368 с.
17. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. М. : Наука, 2001. 560 с.
18. Mikhailov D., Sergeev S. // Water Resources Res. 2019. V. 55, No 5. P. 4220–4232. <https://doi.org/10.1029/2018WR024168>
19. Лебедев А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 4. С. 343–357.
20. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М. : Физматгиз, 1959. 915 с.
21. Исакович М. А. Общая акустика. М. : Наука, 1973. 496 с.

22. Sahimi M. Applications of percolation theory. London : Taylor and Francis, 1994. 258 p.
23. Клеман М., Лаврентович О. Д. Основы физики частично упорядоченных сред. М. : Физматлит, 2007. 680 с.
24. Dvorkin J., Nur A. // Geophysics. 1993. V. 58, No 4. P. 524–533.
25. Dvorkin J., Nolen-Hoeksema R., Nur A. // Geophysics. 1994. V. 59, No 3. P. 428–438.
26. Lebedev A. V., Ostrovsky L. A. // Acoustical Physics. 2014. V. 60, No 5. P. 555–561.
27. Колмогоров А. Н. // ДАН СССР. 1941. Т. 31, № 2. С. 99–101.
28. Ostrovsky L. A., Johnson P. A. // Rivista del Nuovo Cimento. 2001. V. 24, No 7. P. 1–46.
29. Guyer R. A., Johnson P. A. Nonlinear mesoscopic elasticity: the complex behaviour of rocks, soil, concrete. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2009. 410 p.
30. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. М. : Мир, 1971. 557 с.
31. Chrotiros N. P. Acoustics of the seabed as a poroelastic medium. New York : ASA press, Springer, 2017. 99 p.

Поступила в редакцию ?? 2019 г.; принята в печать ?? 2020 г.

NUMERICAL SIMULATION OF THE FILTRATION NOISE

A. V. Lebedev

We simulate filtration noise numerically within the framework of the model proposed earlier for the generation of acoustic noise as a result of excitation of relaxation oscillations. The simulation is performed for characteristic parameters of reservoir rocks. As a result, generation of the radiation frequencies observed in the experiment was demonstrated. It is also shown that due to nonlinear interaction between elementary sources of acoustic radiation, its spectrum is enriched with combination frequencies. In the case of fractionally rational ratios of the frequencies of the interacting oscillators, the acoustic interaction can lead to nonlinear synchronization of elementary radiation sources.